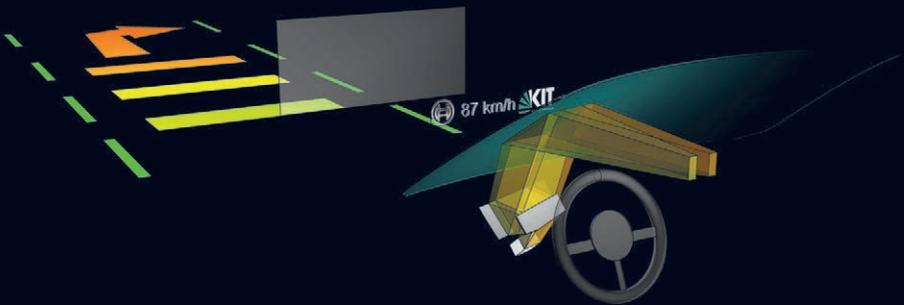


BAND 13 | SPEKTRUM DER LICHTTECHNIK

TOBIAS WERNER

SIMULATION, AUFBAU UND CHARAKTERISIERUNG
VON AUTOSTEREOSKOPISCHEN DISPLAY-SYSTEMEN
IM FAHRZEUGBEREICH



Tobias Werner

**Simulation, Aufbau und Charakterisierung
von autostereoskopischen Display-Systemen
im Fahrzeugbereich**

Lichttechnisches Institut
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Simulation, Aufbau und Charakterisierung von autostereoskopischen Display-Systemen im Fahrzeugbereich

von
Tobias Werner

Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 2016
Referenten: Prof. Dr. rer. nat. C. Neumann
Prof. Dr. rer. nat. W. Stork

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark of Karlsruhe
Institute of Technology. Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed
under the Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 DE License
(CC BY-SA 3.0 DE): <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>*



*The cover page is licensed under the Creative Commons
Attribution-No Derivatives 3.0 DE License (CC BY-ND 3.0 DE):
<http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de/>*

Print on Demand 2017 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 2195-1152

ISBN 978-3-7315-0617-1

DOI: 10.5445/KSP/1000063916

Simulation, Aufbau und Charakterisierung von autostereoskopischen Display-Systemen im Fahrzeugbereich

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der Fakultät für
Elektrotechnik und Informationstechnik
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
genehmigte

DISSERTATION

M.Sc. Tobias Werner
geb. in Heidelberg

Tag der mündlichen Prüfung: 24.11.2016
Hauptreferent: Prof. Dr. rer. nat. C. Neumann
Korreferent: Prof. Dr. rer. nat. W. Stork

INHALTSVERZEICHNIS

Motivation und Ziele	1
1 Grundlagen	5
1.1 Stereoskopisches Sehen	5
1.1.1 Visuelle Tiefenhinweise	5
1.1.2 Konvergenz und Akkommodation	7
1.1.3 Komfortzone und visuelle Überforderung	9
1.2 Head-up Displays	10
1.2.1 HUD-Typen	12
1.2.2 Bildgeberkonzepte	15
1.2.3 Stereoskopische HUDs	19
2 Simulative Methodenentwicklung	25
2.1 Sequentieller Simulationsansatz	26
2.1.1 Design einer angepassten Optimierungsfunktion	26
2.1.2 Integration von Bildgeberelementen	32
2.2 Toleranzanalyse	34
2.2.1 Abbildungsqualität bei Lagetoleranz	34
2.2.2 Eyeboxshift bei Lagetoleranz	36
2.2.3 Messdatenbasierte Simulation von Spiegelementen	40
2.3 Nichtsequentielle Methoden	41
2.3.1 Bildgebereinheit mit Abbildungsoptik	42
2.3.2 Eyeboxausleuchtung bei z-Shift des Beobachters	42
2.3.3 Einführung eines Beobachters	46
3 Konzeptanalyse und Messmethodik	49
3.1 Autostereoskopische HUD-Konzepte	49
3.2 Evaluation von Prototypen	57
4 Projektionsbasierte HUDs	67
4.1 Vielseitig einsetzbare Testoptik	67

4.2	LED-Projektion auf MLA-Fläche	70
4.3	Laserscanner auf MLA-Fläche	78
4.4	Laserscanner auf HOE mit Strahlaufweitung	88
4.5	Lasersprojektion auf HOE	94
4.5.1	DLP-Laserprojektor	95
4.5.2	Holographisches HUD-System	98
4.5.3	Weiterentwicklung des Projektionssystems	105
4.6	Fazit	106
5	LCD-basierte HUDs	109
5.1	LCD-Strahlteilerkonzept	109
5.2	Labordemonstrator mit LCD-Bildgeber	115
5.2.1	Streulflächenbasierte Hinterleuchtung	116
5.2.2	Hinterleuchtung mit strahlformender Homogenisierung	119
5.2.3	Aufbau und Charakterisierung eines Demonstrators	124
5.2.4	Mechanisches Nachführkonzept	128
5.2.5	Single LCD Variante	132
5.3	Frontscheiben-Prototyp	132
5.3.1	Optisches Design	132
5.3.2	Aufbau eines Demonstrators	138
5.4	Fahrzeugdemonstrator	144
5.4.1	Optisches Design	145
5.4.2	Aufbau eines Fahrzeugdemonstrators	155
5.5	Direktabbildender Lentikularlinsenansatz	165
5.5.1	Systemaufbau	166
5.5.2	Doppelbilduntersuchung	173
5.5.3	Sonnenlichtreflektionen	181
5.5.4	Hinterleuchtung	185
5.5.5	Frontscheiben-Demonstrator	187
5.6	Fazit	192
6	Sonderkonzepte	195
6.1	Direktabbildendes HUD mit Mikrodisplay	195
6.1.1	Simulative Auslegung	197

6.1.2 Experimentelle Untersuchung	203
6.2 Volumetrisches HUD	207
6.3 Fazit	216
Zusammenfassung und Ausblick	219
A Anhang	225
A.1 Ergänzungen zur Simulationsmethodik	225
A.1.1 Transmissionsmessung einer LCD-Zelle	225
A.1.2 Messdatenbasierte Simulation von Spiegelementen	225
A.2 Ergänzungen zu Projektionskonzepten	228
A.2.1 Holographisches stereo HUD mit individuellem Projektor	228
A.2.2 Mechanischer Aufbau DLP-Laserprojektor	230
A.3 Ergänzungen zu Displaykonzepten	231
A.3.1 Single LCD Konzept	231
A.3.2 Ansteuerprogramm Fahrzeugdemonstrator	233
Publikationsliste	235
Abkürzungsverzeichnis	239
Abbildungsverzeichnis	241
Tabellenverzeichnis	247
Literaturverzeichnis	249
Danksagung	263

MOTIVATION UND ZIELE

Moderne Fahrzeuge unterstützen den Fahrer mit einer Vielzahl von Assistenzsystemen und Komfortfunktionen, deren Informationen eine effiziente Strukturierung und ergonomische Präsentation erfordern, um eine Überforderung zu vermeiden. Head-up Displays (HUDs) bieten die Möglichkeit, fahrrelevante Informationen in das Blickfeld des Fahrers einzuspiegeln und mit der Fahrscene zu überlagern. Die Blickabwendungszeit des Fahrers beim Ablesen der Informationen wird dadurch wesentlich reduziert, wodurch sich die Fahrsicherheit und der Komfort erhöhen. Konventionelle Head-up Displays bilden auf eine feste Bilddistanz nahe dem Fahrzeug ab. In sogenannten augmented reality HUDs werden ebenfalls feststehende, größere Bilddistanzen realisiert, wodurch virtuelle Bildinhalte direkt am Ort realer Objekte mit der Fahrscene überlagert werden können.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit einem autostereoskopischen Ansatz für Head-up Displays und verläuft begleitend zum öffentlich geförderten Projekt *Picolo* [1].

In den untersuchten Systemen werden den beiden Augen des Fahrers unterschiedliche Teilbilder zugeführt. Bei der Fusionierung dieser beiden Teilbilder durch den Nutzer entsteht ein räumlicher Tiefeneindruck, der die Darstellung virtueller Bildinhalte in verschiedenen Tiefenebenen im Raum ermöglicht. Fahrzeugbezogene Informationen können dadurch beispielsweise in Fahrzeugnähe dargestellt werden, während Navigationshinweise und Warnsymbole in größerer Entfernung platziert und sogar mit der Bewegung realer Objekte zum Nutzer hin und von ihm weg überlagert werden können.

Die technische Realisierung eines autostereoskopischen Head-up Displays stellt hohe Anforderungen an das optische System. Das Licht der beiden Teilbilder muss bereits bei deren Erzeugung voneinander getrennt und auf unterschiedlichen Pfaden dem jeweiligen Auge zugeführt werden. Das System muss außerdem in der Lage sein, sich bei Bewegungen des Nutzers an die jeweilige Augenposition anzupassen.

Das Ziel dieser Arbeit besteht in der simulativen Weiterentwicklung des Designprozesses eines Head-up Displays, sowie in der Entwicklung, Realisierung und Charakterisierung von autostereoskopischen HUD-Konzepten auf Basis unterschiedlicher Technologien. Die entwickelte Simulationsmethodik schließt die besonderen Erfordernisse des autostereoskopischen Ansatzes mit ein und dient als Basis für die Auslegung verschiedener Systeme. Verschiedene Tools werden entwickelt und eingesetzt, die auch auf konventionelle HUD-Systeme anwendbar sind. Die Methodik beinhaltet eine gegenseitige Anpassung der den Bildinhalt generierenden Bildgebereinheit und der nachfolgenden Abbildungsoptik.

Als eine Hauptgruppe autostereoskopischer Ansätze werden projektionsbasierte Konzepte untersucht. Sowohl auf LED-Licht basierende, als auch mit Laserlicht arbeitende Bildgebereinheiten werden behandelt. An das System angepasste Optiken wie z.B. Mikrolinsenarrays werden ausgelegt und eingesetzt. Es finden auch holographisch optische Elemente Einsatz in entsprechenden laserbasierten Systemen.

Als eine weitere Gruppe autostereoskopischer Konzepte werden LCD-basierte Ansätze und deren Evaluation in Laboruntersuchungen vorgestellt. Verschiedene LCD-Konzepte werden in Prototypen umgesetzt. Ein fortgeschrittenes System dient dabei als Fahrzeugdemonstrator,

wobei die Integration ins Fahrzeug in Zusammenarbeit mit der Firma *BMW Forschung und Technik GmbH* erfolgt.

Mit den Prototypen wird eine erfahrbare Plattform für Untersuchungen der Wahrnehmung des Nutzers in anwendungsnahen Systemen bereitgestellt. In einer Sondergruppe von Konzepten wird die direkte Abbildung eines Mikrodisplays über eine stark vergrößernde Optik und ein volumetrischer Ansatz untersucht, um das Potential im HUD-System zu bewerten.

KAPITEL 1

GRUNDLAGEN

1.1 STEREOSKOPISCHES SEHEN

Aufgrund des natürlichen Augenabstandes nimmt das visuelle System des Menschen unterschiedliche Bildinformationen durch beide Augen wahr. Die Wahrnehmung wertet die beiden Bilder sowohl einzeln anhand von monokularen Tiefenkriterien, als auch im Vergleich zueinander durch binokulare Tiefenkriterien aus. Aus der Verarbeitung der beiden Bilder entsteht die räumliche Tiefenwahrnehmung.

Stereoskopische Displaysysteme führen jedem Auge ein unabhängiges Teilbild zu, wodurch sowohl monokulare, als auch binokulare Tiefenhinweise zur Erzeugung eines dreidimensionalen Bildeindrucks genutzt werden können [2, 3]. Die Bildtrennung in separate Teilbilder kann beispielsweise direkt vor dem Auge durch eine 3D-Brille erfolgen. Ist das Displaysystem in der Lage, die Teilbilder bereits vorher aufzutrennen und dem jeweiligen Auge zuzuführen, so ist keine 3D-Brille erforderlich. Es handelt sich dann um ein autostereoskopisches System.

1.1.1 VISUELLE TIEFENHINWEISE

Das visuelle System des Menschen bedient sich verschiedener Kriterien, um einen dreidimensionalen Eindruck einer betrachteten Szene zu generieren. Monokulare Tiefenhinweise können

dabei bereits mit einem Auge wahrgenommen werden, während binokulare Tiefenhinweise auf der Unterschiedlichkeit der von den beiden Augen wahrgenommenen Teilbilder beruhen. Eine Übersicht findet sich in Tab. 1.1 [4, 5, 6].

Monokulare Tiefenhinweise	
Überdeckung	Starkes Tiefenkriterium in allen Abständen
Akkommodation	Scharfstellung der Augenlinse, starkes Kriterium im Nahbereich
Größe	Vergleich mit Erfahrungswerten des Nutzers
Schatten	Einschätzung der relativen Lage zu Lichtquellen und anderen Objekten
Bewegungsparallaxe	Relative Bewegung eines Objektes zur Umgebung bei Bewegung des Betrachterauges. Einziges rein optisches monokulares Tiefenkriterium ohne Bedarf an Erfahrungswerten
Texturgradienten	Sich verengende Muster zu größerer Entfernung
Optisches Flussmuster	Bewegungsgeschwindigkeit des vorbeiziehenden Objekts bei Bewegung des Betrachterauges
Schärfe	Scharfe Objekte treten in den Vordergrund
Relative Höhe	Relative Objektposition zur Horizontlinie oder anderer horizontaler Linien
Binokulare Tiefenhinweise	
Foveale Disparität	Unterschiedliche Position eines abgebildeten Objektpunktes auf der Netzhaut der beiden Augen ermöglichen eine relative Einschätzung zum Fixationspunkt
Binokulare Verdeckung	Objekte verdecken auf beiden Augen unterschiedliche Bereiche des Hintergrundes
Konvergenzwinkel	Winkel zwischen den Sehachsen bei Fixation eines Objekts im Raum

Tabelle 1.1: Übersicht über verschiedene monokulare und binokulare Tiefenhinweise [4, 5, 6].

Viele als 3D-Display bezeichnete Anzeigesysteme bedienen sich nur monoskopischer Tiefenhinweise. Ein Beispiel ist die 3D-Ansicht in gängigen Navigationssystemen. Um auch binokulare Tiefenhinweise geben zu können, werden den beiden Augen des Nutzers in stereoskopischen Anzeigen unterschiedliche Teilbilder präsentiert. Der Begriff der Autostereoskopie bezieht sich auf Systeme, bei denen die beiden Teilbilder den Augen ohne die Notwendigkeit einer zu tragenden Brille zugeführt werden.

1.1.2 KONVERGENZ UND AKKOMMODATION

Beim Betrachten eines Objektes richten sich die Sehachsen der beiden Augen in Richtung des Fixationspunktes aus und bilden den links in Abb. 1.1 veranschaulichten Konvergenzwinkel, der auch Parallaxenwinkel genannt wird. Rechts in der Abbildung ist der Verlauf des Konvergenzwinkels für unterschiedliche Sehabstände im Diagramm aufgetragen. Mit zunehmender Entfernung des Objekts flacht der Kurvenverlauf ab und die Priorität dieses Tiefenhinweises sinkt. Aufgrund der Sensitivität des visuellen Systems des Menschen verliert der Konvergenzwinkel erst ab einem Abstand von etwa 20 m an Relevanz [4].

In Abb. 1.2 ist links die Entstehung des dreidimensionalen Bildeindrucks durch den stereoskopischen Effekt dargestellt. Die beiden Augen sehen jeweils einen dargestellten Pfeil als ein Teilbild. Durch die Verschiebung der beiden Pfeile gegeneinander wird der Konvergenzwinkel zwischen den Sehachsen variiert. Das Objekt wird dadurch stereoskopisch in größerer Entfernung wahrgenommen [7]. Der Versatz zwischen den beiden Teilbildern wird auch als horizontale Parallaxe bezeichnet. Abhängig vom Vorzeichen der horizontalen

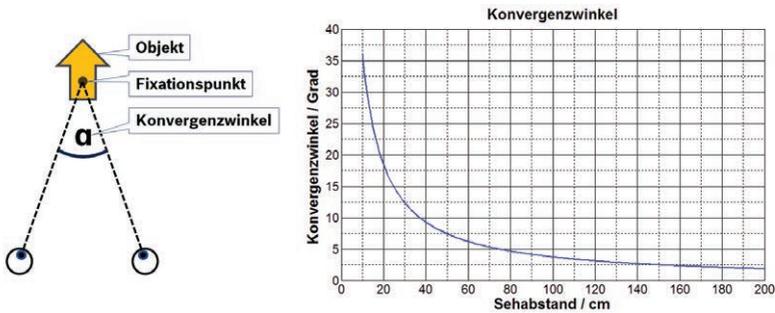


Abbildung 1.1: Links: Konvergenzwinkel zwischen den Sehachsen bei Fixation eines Objektpunktes. Rechts: Konvergenzwinkel in Abhängigkeit vom Sehabstand. Bei großen Distanzen nimmt die Winkeländerung ab. Darstellung in Anlehnung an [6].

Parallaxe erscheint das Bild hinter oder vor der Leinwandebene. Der rechte Teil der Abbildung zeigt den Fall negativer horizontaler Parallaxe, durch die das Objekt scheinbar aus der Leinwandebene heraus tritt.

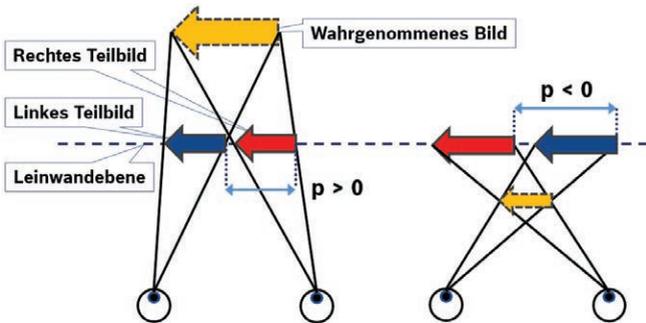


Abbildung 1.2: Abhängigkeit der Bildposition vom Vorzeichen der horizontalen Parallaxe p . Links: Positives Vorzeichen. Das Objekt erscheint scheinbar hinter der Leinwandebene. Rechts: Negatives Vorzeichen. Das Objekt rückt vor die Leinwandebene.

Die Akkommodation (Fokussierung) der Augen erfolgt unabhängig vom wahrgenommenen Objektstand stets auf die Leinwand, wohingegen in der natürlichen Wahrnehmung unserer Umwelt die Akkommodationsdistanz mit dem Objektstand übereinstimmt. Dieser Konflikt zwischen Akkommodation und Konvergenz kann bei größeren Abweichungen zu Unwohlsein und einem Verlust des dreidimensionalen Bildeindrucks führen (vgl. Kap. 1.1.3). Er stellt eine wesentliche Einschränkung in stereoskopischen Displaysystemen dar [8, 9, 3].

Der Konvergenzwinkel und damit die wahrgenommene Objektentfernung hängen vom Augenabstand des Betrachters ab. Ein in dieser Arbeit häufig zugrunde gelegter Augenabstand von 65 mm kann als Durchschnittswert angenommen werden [4]. Der maximal darzustellende Wert der horizontalen Parallaxe im stereoskopischen Displayssystem ist der Augenabstand des Beobachters, wodurch der Bildinhalt scheinbar ins Unendliche verschoben wird.

1.1.3 KOMFORTZONE UND VISUELLE ÜBERFORDERUNG

Aufgrund des Konflikts zwischen Akkommodation und Konvergenz beim stereoskopischen Sehen kann bei zu weitem Verschieben des Bildes weg von der Leinwandebene eine visuelle Überforderung auftreten, die zu Unwohlsein und Übelkeit, oder auch dem Verlust des 3D-Eindrucks führen kann [10, 11]. Der Bereich, in dem eine Verschiebung unter angenehmem Bildeindruck möglich ist, wird durch die sog. Komfortzone beschrieben.

Die Komfortzone ist von verschiedenen Faktoren abhängig und umfasst einen Bereich um die Leinwandebene. Große Leinwanddistanzen vergrößern die Komfortzone und verschieben sie hin zu größeren Entfernungen [12]. Bei kurzen Leinwanddistanzen werden positive horizontale Parallaxen, welche das Bild weiter vom Betrachter weg verschieben, als angenehmer empfunden, während

bei großen Leinwanddistanzen negative horizontale Parallaxen komfortabler wirken [9].

Einen starken Einfluss auf die Komfortzone haben auch die Anzahl der dargestellten Tiefenebenen und die Anzahl der Objekte [13]. Eine in [14] durchgeführte Nutzerstudie zeigt beispielsweise eine Komfortzone zwischen 2,4 m und 26,2 m bei Darstellung einer einzelnen Tiefenebene und einer Leinwanddistanz von 5 m. Über 75 % der Probanden empfanden den stereoskopischen Bildeindruck in diesem Bereich als angenehm. Bei Darstellung mehrerer Tiefenebenen verringerte sich der Bereich auf 3,2 m bis 9,3 m.

Ein gewisser Anteil von Menschen ist nicht in der Lage, dreidimensionale Raumtiefe wahrzunehmen und wird als stereoblind bezeichnet. Häufig wird Stereoblindheit durch unterschiedliche Sehkraft der beiden Augen oder durch ein Schielen ausgelöst. Der betroffene Anteil der Bevölkerung liegt nach Schätzungen zwischen 3 % und 5 %, wobei bis zu 15 % den stereoskopischen Effekt nur eingeschränkt wahrnehmen [5, 15]. Für solche Menschen kann es sinnvoll sein, den stereoskopischen Effekt abzuschalten und den beiden Augen gleiche Teilbilder ohne horizontale Parallaxe anzubieten.

1.2 HEAD-UP DISPLAYS

Head-up Displays sind Anzeigesysteme für die Darstellung von fahrrelevanten Informationen im Fahrzeug, bei denen der Bildinhalt über die Frontscheibe oder eine zusätzliche Combinerscheibe virtuell abgebildet und mit der Fahrscene überlagert dargestellt wird. Für den Betrachter erscheinen die dargestellten Elemente auf einer virtuellen Ebene vor dem Fahrzeug. Dies führt zu geringer Blickabwendungszeit beim Erfassen der Anzeige und erhöht den Komfort und die Sicherheit

beim Fahren [16, 17]. Aktuelle Head-up Displays bilden das Display einer Bildgebereinheit (PGU, Picture Generating Unit) mit Hilfe einer Abbildungsoptik (HUD-Optik) auf eine virtuelle, vor dem Fahrzeug befindliche Leinwandebene ab (vgl. Abb. 1.3).

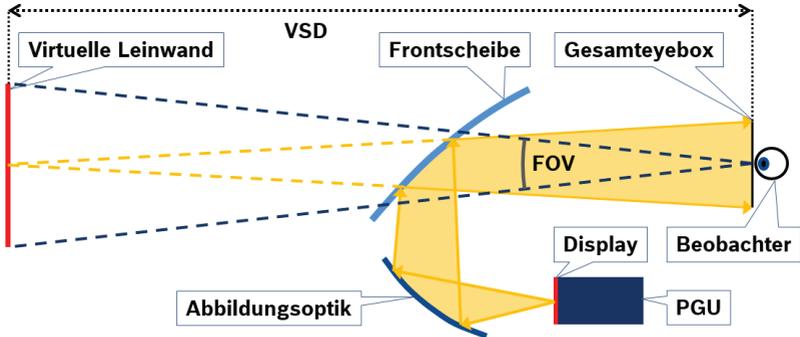


Abbildung 1.3: Darstellung der prinzipiellen Funktionsweise eines Head-up Displays. Dabei wird das Display einer Bildgebereinheit (PGU) auf eine virtuelle Leinwand abgebildet. Die Bildinformation ist aus einem definierten Bereich der Gesamteyebbox heraus sichtbar und kann horizontal und vertikal ein bestimmtes Blickfeld (FOV) einnehmen.

Der Fahrer nimmt ein vergrößertes, der Fahrszene überlagertes Bild im Abstand der virtuellen Leinwand (VSD, virtual screen distance) wahr. Die Abstrahlung am Display der PGU erfolgt in gerichteter Weise, um die Bildinformation dem Auge innerhalb einer Gesamteyebbox anzubieten. Dabei nimmt die virtuelle Leinwand ein maximal nutzbares Blickfeld (FOV, field of view) in der Horizontalen und der Vertikalen ein.

Das Blickfeld wird in horizontaler Richtung meist größer ausgelegt als in der Vertikalen und ist ein wesentlicher Faktor für den notwendigen Bauraum des Systems. Aktuell in der Serie befindliche HUDs bilden

auf eine virtuelle Leinwand im Abstand von etwa 2,5 m unter entsprechender Vergrößerung ab [18].

Die notwendige Vergrößerung durch die Abbildungsoptik nimmt mit dem Abstand der Leinwand zu, sodass das von der PGU erzeugte Bild das gewünschte Blickfeld des Fahrers einnimmt.

Liegt das Zentrum der virtuellen Leinwand vertikal tiefer als das Beobachteraue, so verläuft die Sehachse zur Bildmitte in einem bestimmten Winkel zur Straße, der als *Look Down Angle (LDA)* bezeichnet wird. Bei einer Verschiebung nach rechts oder links im Sichtfeld des Fahrers spricht man vom *Look Over Angle (LOA)*.

1.2.1 HUD-TYPEN

Je nach Aufbau des Spiegelsystems und nach Lage des virtuellen Bildes lassen sich verschiedene HUD-Typen unterscheiden, die im Folgenden vorgestellt werden.

BoxHUD

Das sog. BoxHUD zeichnet sich dabei durch eine Abbildung über die Frontscheibe und eine vergleichsweise kurze virtuelle Leinwanddistanz von etwa 2,5 m bis 3 m aus. Der prinzipielle Aufbau ist in Abb. 1.4 dargestellt. Solche Systeme werden meist verwendet, um Elemente anzuzeigen, die typischerweise auf dem Kombiinstrument beheimatet sind. Dazu gehören beispielsweise die Geschwindigkeitsanzeige, Warnsymbole oder einfache Navigationshinweise. Die abbildende Optik des BoxHUD schließt die Frontscheibe mit ein, wodurch das System speziell an die jeweilige Frontscheibenform angepasst werden muss.

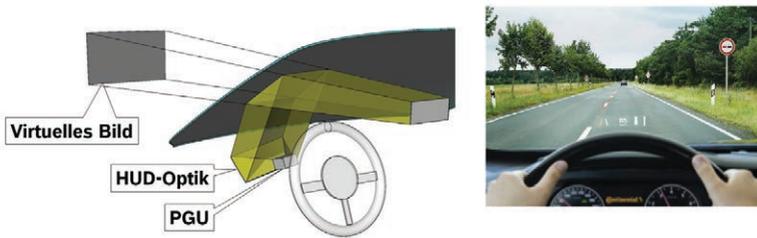


Abbildung 1.4: Links: Prinzipieller Aufbau eines BoxHUDs. Die Bildinformation wird dabei direkt über die Frontscheibe eingespiegelt. Die virtuelle Leinwand befindet sich in etwa 2,5 m bis 3 m. Rechts: Darstellung eines BoxHUDs der Firma Continental [19].

arHUD

Abb. 1.5 zeigt ein augmented reality HUD (arHUD), welches gegenüber dem BoxHUD eine vergrößerte virtuelle Leinwanddistanz besitzt, die hier beispielsweise 7,5 m und mehr betragen kann [18]. Durch die vergrößerte Distanz der Abbildungsebene erhöht sich die notwendige Vergrößerung der abbildenden Spiegeloptik. Oftmals ist dadurch ein System mit erhöhter Anzahl an Freiformspiegeln in der Abbildungsoptik notwendig, um eine hohe Abbildungsqualität zu ermöglichen. Das System ist zudem toleranzanfälliger gegenüber der Frontscheibenform und der Positionierung der Systemelemente. Durch das entfernte virtuelle Bild muss das Auge nur geringfügig zwischen der virtuellen Anzeige und der Realszene umfokussieren.

Es wird dadurch auch ermöglicht, virtuelle Bildinhalte und reale Objekte gleichzeitig scharf zu fokussieren. Die Anzeigeelemente können kontaktanalog mit der Umwelt überlagert werden und beispielsweise andere Verkehrsteilnehmer markieren oder einen Navigationspfeil mit der Straße überlagern. In Fahrsituationen wie einem Verkehrsstau, bei denen sich reale Objekte wie ein vorausfahrendes Automobil dicht

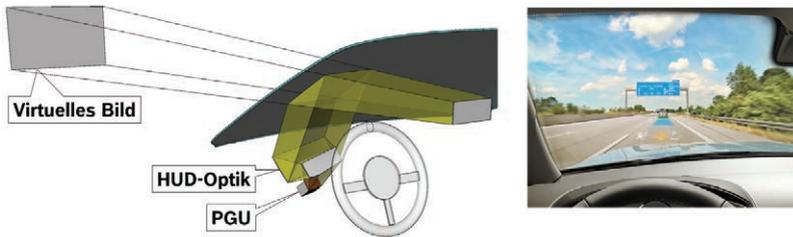


Abbildung 1.5: Links: Prinzipieller Aufbau eines arHUDs. Gegenüber einem BoxHUD befindet sich die virtuelle Leinwand in einem vergrößerten Abstand von beispielsweise 7,5 m. Rechts: Darstellung eines arHUDs der Firma Continental [19].

vor dem Fahrzeug befinden, kann das virtuelle Bild scheinbar in das Objekt eintauchen. Der Tiefenhinweis der Überdeckung steht dann im Konflikt mit der Akkommodation und der Konvergenz, was zu einem unangenehmen Seheindruck führen kann.

CombinerHUD

Als ein weiterer Typ ist in Abb. 1.6 ein sog. Combiner-HUD dargestellt. Statt der Abbildung über die Frontscheibe wird in diesem System eine zusätzliche, transparente Scheibe (Combiner) verwendet, durch die der Fahrer hindurch schaut und über die das virtuelle Bild eingespiegelt wird. Die für den Fahrer sichtbare Combinerscheibe begrenzt durch ihre eigene Größe das Sichtfeld der HUD-Anzeige, wodurch das Sichtfeld dieses HUD-Typs in der Regel geringer als bei anderen Systemen ausfällt. Durch die Verwendung des Combiners wird das HUD unabhängig von der verwendeten Frontscheibe und deren Form- und Lagetoleranz.

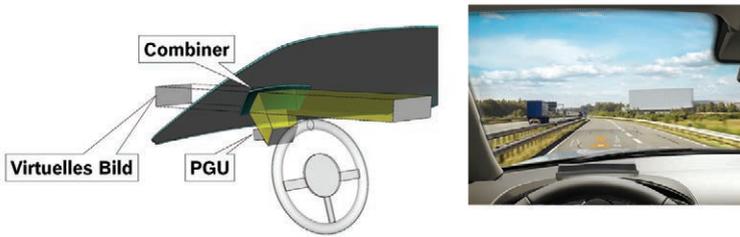


Abbildung 1.6: Links: Prinzipieller Aufbau eines Combiner-HUDs. Die Bildinformation wird dabei statt über die Frontscheibe über eine separate Combinerscheibe eingespiegelt, durch die der Fahrer schaut. Rechts: Darstellung eines Combiner-HUDs der Firma Continental [20].

Während bei anderen Typen die Frontscheibe zu Verzerrungen führt, die von der abbildenden Optik ausgeglichen werden müssen, kann die Form des Combiners frei gewählt werden und zur Vergrößerung des Bildes beitragen. Das System kann dadurch mit einer geringen Zahl an Freiformelementen ausgelegt und in verschiedenen Fahrzeugen eingesetzt werden. Das Combiner-HUD stellt damit den günstigsten Vertreter der HUD-Typen dar und ist in der Regel in der Fahrzeugmittelklasse angesiedelt.

1.2.2 BILDGEBERKONZEPTE

Die Bildgebereinheit eines Head-up Displays erzeugt den Bildinhalt auf der Displayfläche, der über die Abbildungsoptik auf die virtuelle Leinwand abgebildet wird (vgl. Abb. 1.3). Das Display kann beispielsweise als eine hinterleuchtete LCD-Zelle ähnlich einem Handybildschirm oder einem Monitor realisiert sein. Ein alternatives System besteht in der Verwendung eines Projektors, der ein reelles Bild auf eine Projektionsfläche abbildet.

Projektionssysteme

Als Imager im Projektor können polarisationsbasierte LCoS-Chips (Liquid Crystal on Silicon) oder aus einer Spiegelmatrix bestehende DMD-Chips (Digital Micromirror Device) verwendet werden. In Automotivequalität verfügbar sind derzeit DMD-Chips der Firma *Texas Instruments*, die unter der Marke DLP (Digital Light Processing) vertrieben werden [21]. Bei einem DMD-Chip handelt es sich um ein mikroelektromechanisches System (MEMS).

In Abb. 1.7 ist die Funktionsweise der beiden Chips dargestellt. Der einzelne Pixel des DLP-Chips lenkt bei dunklen Pixeln das Licht der Beleuchtung durch Umklappen des Spiegels in eine Lichtfalle um. Bei aktiven Pixeln dreht der LCoS-Chip die Polarisation der Beleuchtung und das Licht wird im Würfel transmittiert. Bei inaktiven Pixeln wird die Polarisation nicht gedreht, wodurch das Licht nach einer zweiten Reflektion im Strahlteilerwürfel zurück in Richtung Lichtquelle strahlt.

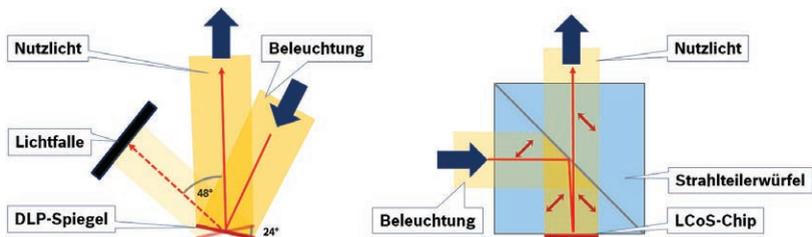


Abbildung 1.7: Links: Funktionsweise eines DLP-Spiegels. Das reflektierte Licht der Beleuchtung steht als Nutzlicht zur Verfügung. Wird der Spiegel umgeklappt, so wird die Reflektion umgelenkt und das Licht wird in eine Lichtfalle geleitet. Rechts: Funktionsweise eines LCoS-Imagers. Ein Pixel des LCoS-Chips wird mit linear polarisiertem Licht über einen diese Polarisation reflektierenden Strahlteilerwürfel beleuchtet. Am Chip wird für einen aktiven Pixel die lineare Polarisation gedreht, sodass das Licht den Würfel nach der Reflektion passiert.

Ein HUD-System auf Basis eines DLP-Projektors funktioniert nach dem in Abb. 1.8 vereinfacht dargestellten Prinzip. Innerhalb des Projektors wird das Licht dreier LEDs in den drei Grundfarben (RGB: Rot, Grün, Blau) kollimiert und über dichroitische Spiegel überlagert. Das Strahlbündel beleuchtet den Imager, der den Bildinhalt generiert. In entsprechender Spiegelposition reflektiert das Spiegelement das Licht, sodass es innerhalb des TIR-Prismas (Total Internal Reflection-Prisma) totalreflektiert und in Richtung des Objektivs umgelenkt wird (vgl. [22]).

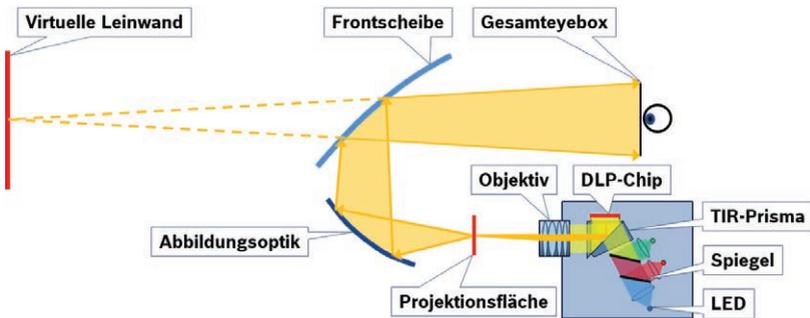


Abbildung 1.8: Darstellung des Funktionsprinzips eines projektorbasierten HUDs. Der Projektor bildet einen Imager als Bildgeber auf eine Projektionsfläche ab, die durch die Abbildungsoptik des HUDs vergrößert und auf die virtuelle Leinwand abgebildet wird.

Durch eine zeitsequentielle Beleuchtung in den drei Grundfarben wird das Bild nacheinander in den Teilfarben aufgebaut. Das Objektiv des Projektors bildet den Imager auf die Projektionsfläche ab, die das Licht jedes abgebildeten Bildpunktes durch ihre streuenden Eigenschaften in einen breiteren Raumwinkel auffächert, sodass jeder Bildpunkt die Gesamteyebox flutet. Der Bildpunkt kann dadurch aus jeder Position innerhalb der Gesamteyebox betrachtet werden.

Eine alternative Technologie zur Realisierung eines Projektionssystems basiert auf einem über die Projektionsfläche gescaantem Laserstrahl. Das Prinzip ist in Abb. 1.9 veranschaulicht. Detailliertere Ausführungen zur Funktionsweise von Projektionssystemen finden sich beispielsweise in [23].

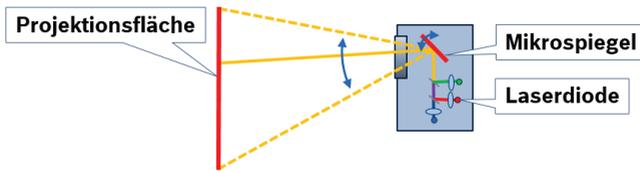


Abbildung 1.9: Darstellung des Funktionsprinzips eines Flying Spot Projektors. Drei kollimierte Laserstrahlen werden überlagert und über einen Mikroskopspiegel über die Projektionsfläche gescaant. Die Laserquellen werden in Pulsen angesteuert und schalten sich bei inaktiven Pixeln ab.

LCD-Systeme

Als Beispiel einer LCD-Zelle als Bildgeber ist in Abb. 1.10 die Funktionsweise einer TN-Zelle (*twisted nematic cell*) anhand eines einzelnen Pixels veranschaulicht. Links dargestellt ist die Zelle im Ruhezustand. Die Zelle wird von unten mit zunächst unpolarisiertem Licht beleuchtet, das am ersten Polarisator linear polarisiert wird. Die Flüssigkristalle befinden sich zwischen zwei Glasplatten, an denen die angrenzenden Moleküle im Winkel von 90° zueinander verankert sind. Die freien Moleküle ordnen sich in einer Schraubenform an und drehen die Polarisationsrichtung des transmittierten Lichts, sodass es den zweiten Polarisator passieren kann.

Rechts dargestellt ist das Verhalten bei angelegter Spannung zwischen den Substraten. Die Flüssigkristalle richten sich senkrecht aus und

bilden keine polarisationsdrehende Schraubenform mehr. Das Licht wird dadurch am oberen Polarisator blockiert.

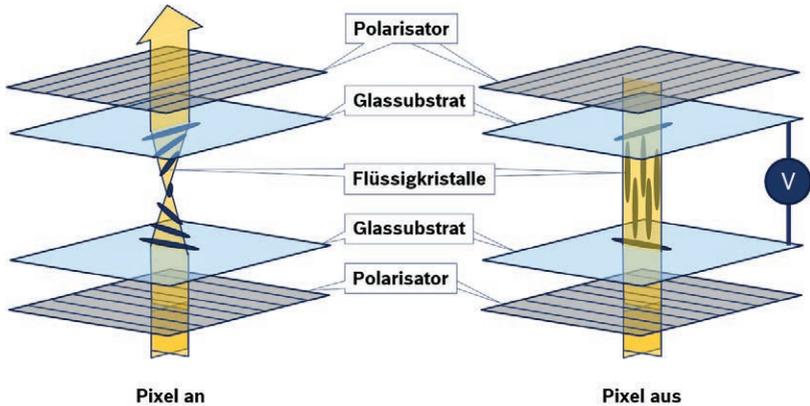


Abbildung 1.10: Darstellung des Funktionsprinzips einer TN-Zelle (*twisted nematic cell*). Links: Die Flüssigkristalle liegen in horizontalen Ebenen und bilden eine Schraubenform, die an den Glassubstraten verankert ist. Dadurch wird die Polarisation des Lichts gedreht und es passiert die gekreuzten Polarisatoren. Rechts: Bei Anlegen einer Spannung richten sich die beweglichen Flüssigkristallmoleküle nach den elektrischen Feldlinien aus. Es findet keine Polarisationsdrehung statt und das Licht wird am zweiten Polarisator ausgefiltert (eigene Darstellung nach [24]).

1.2.3 STEREOSKOPISCHE HUDS

Autostereoskopische Head-up Displays stellen dem Nutzer verschiedene Teilbilder für die beiden Augen bereit und nutzen den stereoskopischen Effekt, um dreidimensionale Tiefe zu erzeugen. Die im Raum verschiebbaren Bildinhalte bieten eine gegenüber konventionellen HUDs erweiterte Funktionalität. So können Elemente mit der realen Bewegung von Objekten mitgeführt werden.

Scheinbar auf den Beobachter zukommende Symbole erregen besondere Aufmerksamkeit, was beispielsweise bei der Einblendung von kritischen Warnsymbolen oder Fußgängermarkierungen eingesetzt werden kann [25].

Bildinhalte können in größere Entfernungen hinter der Leinwand verschoben werden, wodurch das System augmented reality Funktionalität bei reduzierter Leinwanddistanz ermöglicht. Dadurch verringern sich die Anforderungen an die Abbildungsoptik, was unter anderem die Toleranzanfälligkeit verbessert.

Es besteht die Möglichkeit, bei dichtem Verkehr die Bilddistanz zu reduzieren oder beispielsweise der Geschwindigkeit des Fahrzeugs anzupassen. Dadurch wird der von arHUDs bekannte Konflikt zwischen Bilddistanz und Überdeckung vermieden. Bei Bedarf kann der 3D-Effekt abgeschaltet werden, indem den Augen des Nutzers gleiche Teilbilder präsentiert werden. Das System kann dadurch auch von stereoblinden Nutzern verwendet werden.

Systemaufbau

Abb. 1.11 zeigt den schematischen Aufbau eines autostereoskopischen HUDs. Durch die stereoskopische Verschiebung des Bildinhalts wird zwischen der virtuellen Bilddistanz (VID, virtual image distance) und der virtuellen Leinwanddistanz (VSD, virtual screen distance) unterschieden.

Das von der Bildgebereinheit abgestrahlte Licht ist in zwei unabhängige Teilbilder geteilt, die anders als bei konventionellen HUDs nicht mehr die komplette Gesamteyebow fluten, sondern dem Auge jeweils in einer schmalen Eyebow angeboten werden. Die Bildgebereinheit

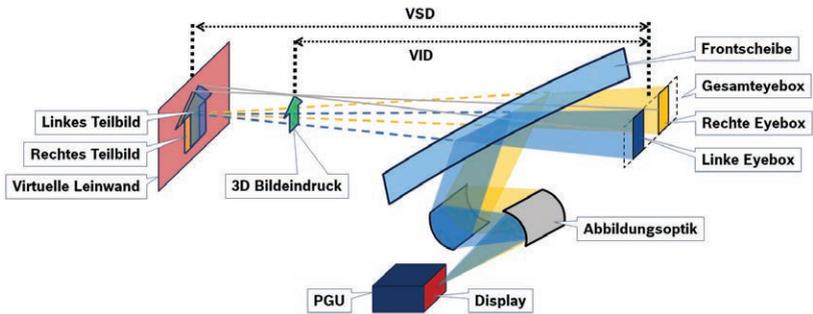


Abbildung 1.11: Darstellung des Funktionsprinzips eines stereoskopischen HUDs. Die Bildgebereinheit (PGU) strahlt die Teilbilder in unterschiedliche Raumrichtungen ab, wodurch die Teilbilder jeweils nur aus getrennten Eyeboxen gesehen werden können. VSD: Virtual Screen Distance, VID: Virtual Image Distance.

ist in der Lage, die Abstrahlung variabel an die Kopfposition anzupassen, um die generierten Eyeboxen mit der Bewegung des Nutzers nachzuführen. Zur Nachverfolgung des Nutzers wird in der Regel ein kamerabasiertes Head-Tracking System eingesetzt.

Warping

In HUD-Systemen tritt eine Verzerrung des von der Bildgebereinheit dargestellten Bildinhaltes auf, die beispielsweise durch die Abbildung über die unregelmäßig geformte Frontscheibe und die off-axis-Positionierung der Spiegeloptiken verursacht wird. Die Freiformspiegel der Abbildungsoptik sind ausgelegt, um diesen Effekt zu kompensieren. Dennoch treten auch bei vollständig ausdesignten Head-up Optiken Verzeichnungen des Bildes auf.

Eine solche Verzeichnung kann kompensiert werden, indem ein bereits vorverzerrtes Bild auf dem Display der Bildgebereinheit angezeigt

wird [26]. Dieses als Warping bezeichnete Verfahren mindert den auf dem Display nutzbaren Bereich, da, um die Verzerrung darstellen zu können, ein gewisser Randbereich vorgehalten werden muss. Die Maßnahme führt zu einem Auflösungsverlust, der abhängig von der am Display der Bildgebereinheit darzustellenden, vorverzerrten Form über die Fläche des Bildes variieren kann. Die Abbildungsoptik des Systems bildet die dargestellte Form unverzerrt auf die Leinwandebene ab und füllt das komplette Blickfeld aus.

Die Verzeichnung des Bildes kann in einen statischen und einen dynamischen Anteil unterschieden werden. Der statische Anteil bleibt konstant für Positionen des Beobachters über die Gesamteyebox, während der dynamische Anteil bei Betrachtung aus verschiedenen Positionen Änderungen erfährt. Da bei konventionellen HUDs die Kopfposition unbekannt ist, wird das Warping zur Kompensation des statischen Anteils verwendet.

Im autostereoskopischen HUD kann durch die Kenntnis der Augenpositionen und durch das Generieren unabhängiger Teilbilder das Warping zur Kompensation entstehender Verzeichnungen positionsabhängig und für jedes Auge einzeln angepasst werden. Dadurch können sowohl der statische als auch der dynamische, sich bei Bewegungen in der Gesamteyebox ändernde Anteil der Verzeichnung kompensiert werden. Die durch das Head-Tracking System zur Verfügung stehende Information kann auf diese Weise in einem dynamischen 3D-Warping genutzt werden [27].

Bewegungsparallaxe

Trotz dass Bildinhalte durch den stereoskopischen Effekt in unterschiedlichen Distanzen dargestellt werden können, verhalten sich

angezeigte Objekte bei einer Verschiebung des Betrachterauges perspektivisch entsprechend der Leinwanddistanz [28]. Ohne eine Anpassung der Position des Objekts entsteht dadurch eine inkorrekte Bewegungsparallaxe. Der Effekt ist in Abb. 1.12 veranschaulicht und tritt sowohl in horizontaler, als auch in vertikaler Richtung auf.

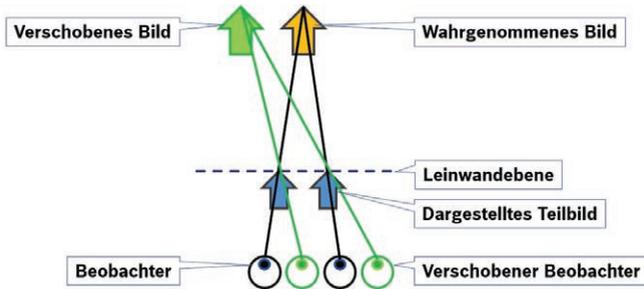


Abbildung 1.12: Bewegungsparallaxe bei einer Verschiebung der Beobachterposition. Wird der Beobachter ohne Anpassung der dargestellten Teilbilder verschoben, so verschiebt sich auch der wahrgenommene Bildinhalt und verhält sich damit verschieden zur realen Umwelt in der Bilddistanz.

Darin wird der Bildinhalt in einiger Entfernung hinter der Leinwand dargestellt. Nach einer in Grün dargestellten Verschiebung der Beobachterposition verschiebt sich ohne Anpassung der auf der Leinwand dargestellten Teilbilder auch das wahrgenommene Objekt.

Die Anpassung der Bewegungsparallaxe im autostereoskopischen Head-up Display erfolgt auf Basis der Head-Tracking Daten und kann mit in der Warpingfunktion implementiert werden. Die dargestellten Objekte der beiden Teilbilder werden abhängig vom virtuellen Bildabstand mit der Kopfposition nachgeführt. Als monokularer Tiefenhinweis ist die Bewegungsparallaxe nicht auf die Separierung in stereoskopische Teilbilder angewiesen und stellt auch für stereoblinde

Nutzer oder bei einer Deaktivierung des stereoskopischen Effekts einen wichtigen Tiefenhinweis dar, der im autostereoskopischen HUD genutzt werden kann.

Nach der Einführung des stereoskopischen Sehens und des autostereoskopischen HUD-Ansatzes werden im folgenden Kapitel simulative Methoden entwickelt, welche im optischen Designprozess zur Auslegung solcher Systeme dienen. Auf Basis dieser Simulationsmethodik werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit prototypische Designs realisiert und evaluiert.

KAPITEL 2

SIMULATIVE METHODENENTWICKLUNG

Bei der Simulation von HUD-Systemen kann zwischen sequentiellen Ansätzen, bei denen die Lichtstrahlen eine vordefinierte Reihenfolge von optischen Flächen durchlaufen, und nichtsequentiellen Ansätzen unterschieden werden, bei denen die Lichtstrahlen in den optischen Elementen beispielsweise Doppelreflektionen erfahren oder gestreut werden können. Nichtsequentielle Simulationen eignen sich für Anforderungen außerhalb der abbildenden Optik wie beispielsweise das Ausleuchten von homogenen, abgegrenzten Eyeboxen.

Im Designprozess der Abbildungsoptik werden konventioneller Weise Lichtstrahlen sequentiell aus der virtuellen Abbildungsebene des HUDs gestartet und auf die Displayfläche abgebildet, wobei die Gesamteyebox als Systemapertur gewählt wird, welche die Strahlenbündel der simulierten Feldpunkte begrenzt. Dieser gegenüber dem realen Lichtweg invertierte Aufbau erleichtert die Berechnung des Ray Tracings, da zwischen dem virtuellen Bild und der Gesamteyebox keine Optiken liegen, durch die die Abstrahlung der Feldpunkte zum Ausfüllen der Systemapertur angepasst werden müsste.

Die parametrische Auslegung des Systems erfolgt durch Minimierung einer Optimierungsfunktion (Merit Function), welche die Abweichung der Systemperformanz von definierten Zielwerten gewichtet. Die Modellparameter des simulierten Systems werden durch lokale und globale Optimierungsalgorithmen zur Minimierung der Optimierungsfunktion variiert. Es ist dabei stets auf äußere

Rahmenbedingungen des Systems, wie beispielsweise mechanische Umsetzbarkeit, eingenommener Bauraum, Toleranzanfälligkeit oder Streulichtanfälligkeit des Gesamtsystems zu achten.

Im Folgenden werden verschiedene Methoden vorgestellt, die für die Auslegung von autostereoskopischen Konzepten entwickelt und verwendet wurden. Dabei wird sowohl sequentielle, als auch nichtsequentielle Methodik eingesetzt.

2.1 SEQUENTIELLER SIMULATIONSANSATZ

Der sequentielle Simulationsansatz bietet den Vorteil einer schnellen Konvergenz und eignet sich für Systeme mit einer hohen Anzahl an freien Modellparametern, wie beispielsweise den Koeffizienten, die die Oberfläche der Freiformspiegel eines HUD-Systems beschreiben [29].

2.1.1 DESIGN EINER ANGEPASTEN OPTIMIERUNGSFUNKTION

Die Minimierung einer Optimierungsfunktion stellt immer einen Kompromiss aus verschiedenen Zielgrößen für die Optik des Head-up Displays dar. Ein grundlegender Kompromiss ist dabei der zwischen der durch die Optik entstehenden Verzeichnung im Bild und der Spotgröße der Abbildung. Da bei autostereoskopischen Konzepten den beiden Augen voneinander unabhängige Teilbilder präsentiert werden und die Augenposition zwecks der Nachführung zu jedem Zeitpunkt erfasst werden muss, kann die auftretende Verzeichnung durch eine Vorverzerrung des Bildinhaltes dynamisch an die jeweilige Augenposition angepasst werden. Das autostereoskopische System ist daher besonders robust gegenüber Verzeichnungen.

Es wurde daher ein Makro entwickelt, welches für beliebige HUD-Systeme eine Optimierungsfunktion erstellt, die eine Gewichtung der zu erreichenden Verzeichnung und der Spotgröße zulässt. Die Funktionsweise der Funktion wurde im Rahmen dieser Arbeit veröffentlicht [30].

Diese angepasste Optimierungsfunktion begrenzt dabei das durch die Vorverzerrung darzustellende Bild auf den physikalisch verfügbaren Displaybereich der Bildgebereinheit und limitiert die zulässige Schräglage des Displays. Je nach Design kann die Abbildungsqualität durch eine Schrägstellung des Displays zwar beispielsweise in Bezug auf Astigmatismus und Spotgröße verbessert werden, allerdings wird dadurch auch die Realisierung der Hinterleuchtung erschwert.

Insbesondere bei auf LCD-Technologie beruhenden Bildgebereinheiten kann dies zum Problem werden, da LCD-Panels bei schrägem Durchleuchten weniger transmissiv sind (vgl. Kap. A.1.1 im Anhang, S. 225).

Die entwickelte Optimierungsfunktion bietet zusammenfassend folgende Funktionalität:

- Simulation einer definierbaren Anzahl von Feldpunkten
- Simulation einer definierbaren Anzahl von Stützstellen in der Gesamteyebow
- Einhaltung der vorgegebenen Displaydimension
- Gewichtungsmöglichkeit der zu erreichenden Spotgröße gegenüber der Verzeichnung der Abbildung
- Beschränkung der Verzeichnung auf den Displaybereich der Bildgebereinheit
- Beschränkung der auf dem Display erlaubten Winkel zur Oberflächennormalen

Die im System auftretende Verzeichnung wird bestimmt aus einem statischen und einem dynamischen Anteil. Der statische Anteil beschreibt

eine Verzeichnung, die aus jeder Position innerhalb der Gesamteyebox auftritt. Zu diesem addiert sich ein dynamischer Anteil, dessen Beitrag bei der Bewegung durch die Gesamteyebox variiert.

Die optische Abbildung erfolgt simulativ zunächst vom virtuellen Bild auf das Display der Bildgebereinheit (vgl. Abb. 2.9, S. 47). Da im simulierten System die gesamte Gesamteyebox als Systemapertur genutzt wird, über die die einzelnen Feldpunkte des virtuellen Bildes abgebildet werden, stellt die erreichte Spotgröße auf dem Display ein Maß für den dynamischen Anteil der Verzeichnung dar.

Die durch die vorgestellte Optimierungsfunktion zugelassene Verzeichnung zugunsten einer geringeren Spotgröße stellt einen statischen Anteil dar und kann somit auch bei konventionellen, nicht stereoskopischen HUD-Systemen durch Warping ausgeglichen werden. Damit eignet sich die Funktion auch für solche HUDs.

In Abb. 2.1 ist eine HUD-Optik dargestellt, die mit einer als Ausgangsfunktion dienenden, konventionellen Optimierungsfunktion designt wurde, welche bereits bei der Entwicklung von Seriensystemen genutzt wurde. Das gleiche Design wurde zum Vergleich mit der entwickelten Funktion optimiert, wobei sonst gleiche Einschränkungen für die Position und die Größe der Spiegel vorgegeben wurden. Die Funktion wurde dabei in zwei Durchläufen unterschiedlich parametrisiert.

Die Abbildungsqualität der entstandenen Designs wurde mit Hilfe eines von *Bosch Car Multimedia* entwickelten Tools untersucht, welches die Leinwanddistanz in unterschiedlichen Punkten, sowie die Spotgrößen auf der Displayfläche und den Astigmatismus auswertet [31]. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Tab. 2.1 dargestellt.

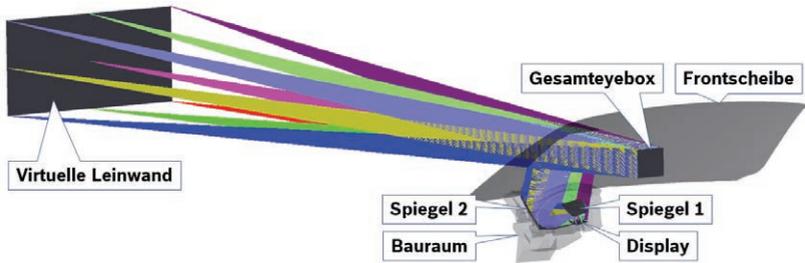


Abbildung 2.1: HUD-Design mit einem Freiformspiegel und einem Planspiegel, 3 m Leinwanddistanz, einem Field of View von $9^\circ \times 4^\circ$ und einem 3,1“-Display. Dieses Design wurde im Weiteren mit verschiedenen Optimierungsfunktionen optimiert (vgl. Tab. 2.1).

Design A wurde dabei mit der konventionellen Optimierungsfunktion optimiert. In Design B kam eine Funktion zum Einsatz, die mit dem eigenen Tool erstellt wurde und die Spotgröße gegenüber der Verzeichnung bevorzugt. Das Design hat sich hinsichtlich der Spotgröße und der Standardabweichung der VSD als Maß für die Bildfeldwölbung verbessert. Der Astigmatismus hat sich leicht verschlechtert und die Leinwanddistanz blieb nahezu gleich. Durch eine noch weiter erhöhte Priorisierung der Spotgröße bei der Generierung der Optimierungsfunktion entstand Design C. Bei diesem Design ist eine deutliche Verbesserung der Abbildungsqualität gegenüber Design A zu erkennen. Die durchschnittliche Spotgröße ist dabei von rund $35 \mu\text{m}$ auf $26 \mu\text{m}$ gesunken, wodurch sich eine erhöhte Auflösung durch das optische System transportieren lässt.

Die Bildfeldwölbung wurde ebenfalls nochmals deutlich reduziert und der Astigmatismus bewegt sich in Anbetracht der Standardabweichung bei Design A und C in ähnlichem Bereich.

Abb. 2.2 zeigt die simulierte Abbildung eines Gitters von der virtuellen Leinwand auf das Display der Bildgebereinheit.

Parameter	Mean	Std	Min	Max
Design A (konv.)				
VSD / m	2.9715	0.2498	2.5301	4.2548
AST / m	0.1297	0.3024	-0.8680	1.9649
Spot / μm	34.8566	19.2811	1.447	137.0990
Design B (mod MF)				
VSD / m	2.9501	0.2117	2.5514	3.9634
AST / m	0.1920	0.2731	-0.4757	1.9346
Spot / μm	32.4698	17.3588	1.7430	104.7490
Design C (mod MF)				
VSD / m	2.9523	0.1735	2.5800	3.6608
AST / m	0.1708	0.2284	-0.2928	1.3574
Spot / μm	26.1814	13.4305	0.7530	86.0140

Tabelle 2.1: Vergleich der Abbildungsqualität von drei Designs, die aus einem identischem Ausgangszustand mit konventioneller und angepasster Optimierungsfunktion entstanden sind. Angegeben sind jeweils Mittelwert, Standardabweichung, Minimalwert und Maximalwert der Leinwanddistanz (VSD), des Astigmatismus (AST) und der Spotgröße (Spot).

Da der Lichtweg umkehrbar ist, bezeichnet die Gitterform auf dem Display die Orte, von denen die Strahlen starten müssen, um auf der virtuellen Leinwand ein unverzerrtes Bild entstehen zu lassen. Aufgabe des Warpings ist es, genau dieses Bild darzustellen. Damit das Display in der Lage ist, das vorverzerrte Bild zu zeigen, dürfen die Lichtstrahlen den physikalisch nutzbaren Bereich nicht verlassen. Die Abmessungen sind jeweils durch den roten Kasten markiert. Design B zeigt gegenüber Design A eine erhöhte Verzeichnung, die zugunsten der geringeren Spotgröße zugelassen wurde. In Design C wurde eine noch höhere Verzeichnung zugelassen, um die Bildqualität weiter zu erhöhen.

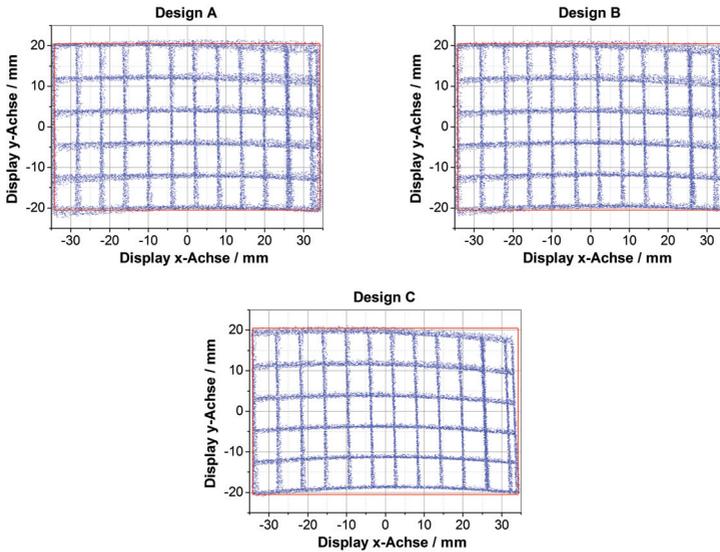


Abbildung 2.2: Vergleich der Verzeichnung bei verschiedenen, verwendeten Optimierungsfunktionen. Es werden jeweils die Auftreffpunkte simulierter Lichtstrahlen ausgehend aus einem Gitter auf der virtuellen Leinwand gezeigt. Das Gitter beschreibt quadratische Flächen mit einer Doppellinie am rechten Rand. In Design A wurde eine konventionelle Optimierungsfunktion verwendet. Die Designs B und C wurden mit unterschiedlichen Parametern einer eigenen Optimierungsfunktion erstellt. Diese Designs erlauben eine höhere Verzeichnung, um eine bessere optische Abbildung zu erreichen und nutzen den Bereich des physikalischen Displays (rot).

Da die angepasste Optimierungsfunktion die Lichtstrahlen in den physikalisch nutzbaren Bereich des Displays zwingt, tritt das verzerrte Bild kaum aus diesem Bereich heraus. Das wenig verzerrte Bild aus Design A hingegen tritt trotz geringer Verzeichnung aus dem Displaybereich. Der Rand des Gitters kann damit nicht mehr dargestellt werden und das wahrgenommene virtuelle Bild wird beschnitten.

Auch in Design B und C wird ein Großteil der physikalisch nutzbaren Fläche ausgefüllt. Der Auflösungsverlust des Bildes durch die Vorverzerrung des Waring fällt daher sehr gering aus.

2.1.2 INTEGRATION VON BILDGEBERELEMENTEN

In konventionellen HUD-Systemen wird typischerweise zunächst die Abbildungsoptik sequentiell ausgelegt, um das virtuelle Bild möglichst gut auf das Display der Bildgebereinheit abzubilden. Die Bildgebereinheit selbst wird anschließend derart ausgelegt, dass die Bildinformation die komplette Gesamteyebow flutet. Es ergibt sich dadurch eine vergleichsweise breite Abstrahlung des Bildes am Display. Wird diese Abstrahlung nicht exakt erreicht, so wirkt sich dies lediglich auf den Randbereich der Gesamteyebow aus oder sie kann gar von den Aperturen der abbildenden Spiegel abgeschnitten werden.

Um im autostereoskopischen System schmale Eyebowen für das jeweilige Auge zu generieren, muss das Display der Bildgebereinheit in schmale Raumwinkel abstrahlen. Diese beispielsweise pyramidenförmig ausgebildeten Kegel müssen eine sehr präzise Abstrahlbedingung einhalten. Wird die abbildende Optik des HUDs rein auf eine optimale Abbildung vom virtuellen Bild auf das Display optimiert, so können sich unregelmäßig verteilte und durch die Hinterleuchtung schwer realisierbare Abstrahlbedingungen am Display ergeben. Ein entwickelter und im Rahmen dieser Arbeit veröffentlichter Ansatz besteht darin, Elemente der Bildgebereinheit bereits in die sequentielle Simulation zur Auslegung der Abbildungsoptik zu integrieren [30].

In Abb. 2.3 ist die Simulation einer HUD-Optik dargestellt, bei der verschiedene Bildgeberelemente enthalten sind. Das genaue

Funktionsprinzip findet sich in der Beschreibung des nach diesem Design entwickelten Prototypen in Kapitel 5.4. Dabei werden mehrere Linsenstufen und ein Mikrolinsenarray genutzt, um eine LCD-Zelle in jedem Punkt aus den Richtungen zu hinterleuchten, die zur Formung einer Eyebox am Ort des Beobachterauges notwendig sind.

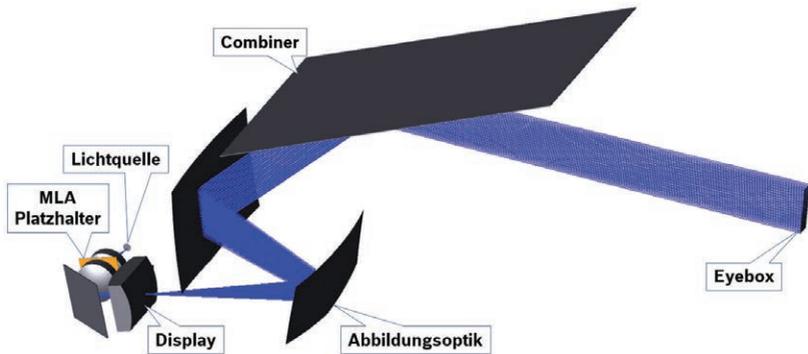


Abbildung 2.3: Sequentielle Simulation zur Auslegung der Abbildungsoptik eines HUD-Systems mit integrierten Elementen der Bildgebereinheit. Der simulierte Feldpunkt wird dabei am Ort der Lichtquelle zu einem Punkt fokussiert, an dem die Lichtquelle platziert werden kann.

Das Mikrolinsenarray als nichtsequentielles Element wurde in der Simulation durch eine plane Glasscheibe ersetzt. Die eingezeichneten Strahlen stellen das notwendige Licht für den zentralen Displaypunkt dar, die dem optischen Konzept nach parallel durch das MLA verlaufen. Um im Betrieb des HUDs eine Punktlichtquelle wie beispielsweise eine LED zur Hinterleuchtung einsetzen zu können, muss dieses Licht zu einem Punkt in der Hinterleuchtung fokussiert werden. Eine weitere Bedingung ist das parallele Durchstrahlen der eingesetzten Glasscheibe als Platzhalter für das MLA. Nach einem ersten Designschritt, in dem die Positionierung der

Spiegelelemente in einer Simulation des Systems vom virtuellen Bild hin zur Displayfläche der Bildgebereinheit festgelegt wurde, werden die beiden Bedingungen der Optimierungsfunktion hinzugefügt. Es erfolgt ein weiterer Optimierungsschritt mit einer Anpassung der optischen Elemente.

Die freigegebenen Variablen sind dabei die Oberflächenkoeffizienten der Freiformspiegel, um eine Feinjustage der Abstrahlbedingungen am Display zu ermöglichen, sowie Parameter der Linsenoptiken. Auf diese Weise kann die Abbildungsoptik auf die Anforderungen der Hinterleuchtung angepasst und es können Elemente der Bildgebereinheit ausgelegt werden. Dieser Schritt reduziert die Komplexität der zeitintensiven, nichtsequentiellen Auslegung der Bildgebereinheit erheblich.

2.2 TOLERANZANALYSE

In der Toleranzanalyse werden die Auswirkungen von Fertigungs- und Montagefehlern auf ein optisches Design untersucht. Aus technischen Gründen kann die simulativ bestimmte Oberflächenform und die Positionierung, sowie die Ausrichtung der Elemente im System nicht exakt eingehalten werden. In diesem Abschnitt wird zunächst der Einfluss von Lagetoleranzen mit verschiedenen Ansätzen charakterisiert.

Anschließend wird eine Methode zur Untersuchung der Auswirkungen einer abweichenden Spiegelform vorgestellt.

2.2.1 ABBILDUNGSQUALITÄT BEI LAGETOLERANZ

Das Optiks simulationsprogramm *Zemax* bietet eine integrierte Tolerancing Funktion, die es ermöglicht, mit Hilfe von Monte Carlo

Simulationen die Auswirkungen von Lagetoleranzen zu untersuchen. Dabei wird einzelnen Elementen oder Elementgruppen jeweils ein erlaubter Bewegungsspielraum zugewiesen. Die Elemente werden in verschiedenen Simulationen zufällig variiert und das System jeweils ausgewertet. Bestimmte Parameter, wie beispielsweise Abstände zwischen zwei Elementgruppen, die im realen System justierbar sind, können als Kompensatoren definiert werden. Mit Hilfe des Tolerancings kann beispielsweise die verursachte Vergrößerung der abgebildeten Spots bestimmt werden. Die angenommenen Toleranzen der Elemente hängen unter anderem von erreichten Fertigungstoleranzen ab. Für das in Abb. 2.4 dargestellte HUD-Design wurde eine Toleranzanalyse mit beispielhaften Parametern vorgenommen.

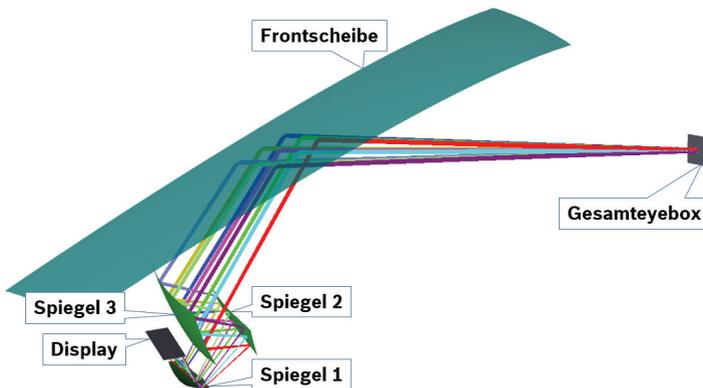


Abbildung 2.4: Beispielsystem zur Untersuchung von Spotgrößen bei Lagetoleranz. Bei einer Variation der HUD-Elemente und des Gesamtsystems um $0,2\text{ mm}$ und $0,2^\circ$ in alle Raumrichtungen erhöht sich die Spotgröße der Abbildung auf das Display der Bildgebereinheit von $28\ \mu\text{m}$ auf $30\ \mu\text{m}$.

Die drei Freiformspiegel der Abbildungsoptik, sowie das Display und die Frontscheibe wurden jeweils um $\pm 0,2\text{ mm}$ in alle Raumrichtungen

verschoben und um $\pm 0,2^\circ$ gedreht. Das HUD-Gesamtsystem wurde als Einheit ebenfalls um diese Werte variiert und es wurden 1000 Monte Carlo Simulationen mit normalverteilten Werten der Parametervariationen durchgeführt. Die ursprüngliche Spotgröße von neun gitterförmig im virtuellen Bild verteilten Feldpunkten betrug durchschnittlich $28 \mu\text{m}$, wobei über eine 8 mm Apertur im Zentrum der Gesamteyebow abgebildet wurde, was einem zentral positionierten Beobachteraue entspricht.

Als Ergebnis der Toleranzuntersuchung zeigten 98 % der Variationen eine durchschnittliche Spotgröße von unter $36 \mu\text{m}$. Verglichen mit der in Kap. 2.2.3 vorgestellten Erhöhung der Spotgröße durch die reale Spiegeloberfläche leistet die Lagetoleranz hier nur einen geringen Beitrag.

2.2.2 EYEBOWSHIFT BEI LAGETOLERANZ

Wesentliche negative Effekte, die durch die Lagetoleranz der HUD-Elemente verursacht werden, liegen in einem Abdriften der EB-Position oder des virtuellen Bildes. Eine Verdrehung eines HUD-Spiegels kann dazu führen, dass das die Bildinformation tragende Lichtbündel von nachfolgenden Aperturen beschnitten wird. Es ist daher ein entsprechender Vorhalt in der Größe der Spiegel und der Gesamteyebow, sowie im realisierten Blickfeld einzuhalten.

Um die Verschiebung der Eyebow oder des virtuellen Bildes für beliebige HUD-Systeme untersuchen zu können, wurde ein Tool entwickelt, das ein entsprechendes Tolerancing auf Basis von Monte Carlo Simulationen durchführt. In Abb. 2.5 ist der Ablauf der mit Hilfe des Tools durchgeführten Analyse dargestellt.

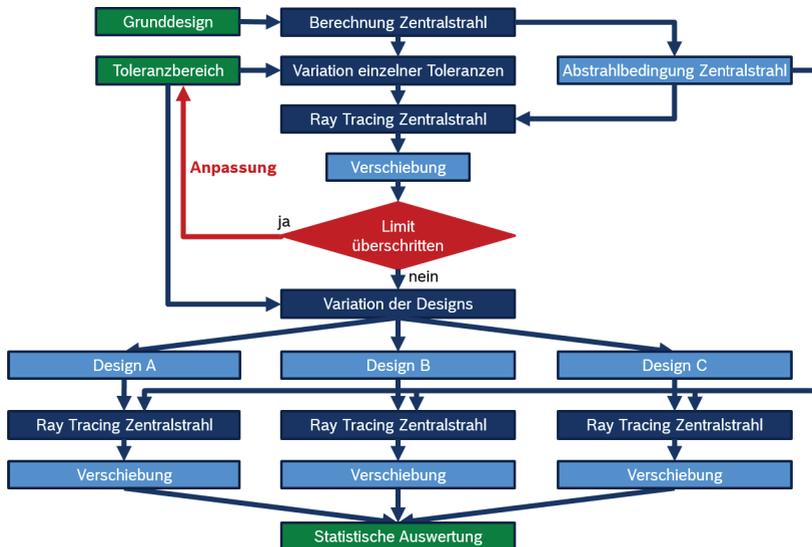


Abbildung 2.5: Ablaufdiagramm der Toleranzuntersuchung bezüglich einer Verschiebung der Gesamteyebox oder des virtuellen Bildes mit Hilfe eines entwickelten Tools.

Der Nutzer stellt das zu untersuchende, nicht invertierte Design zusammen mit einer Definition des Toleranzbereiches bereit (Grün) und startet das Programm über eine grafische Oberfläche in *Matlab*. Das Tool berechnet zunächst die Abstrahlrichtung des die Gesamteyebox in der Mitte treffenden Zentralstrahls und legt die Information ab. Im nächsten Schritt werden die Extremwerte in Form einer Sensitivitätsanalyse einzelner, tolerierter Parameter angenommen und die resultierende Verschiebung untersucht. Optional kann an dieser Stelle in Form einer inversen Sensitivitätsanalyse geprüft werden, ob die durch den einzelnen Parameter verursachte Verschiebung ein definiertes Limit überschreitet (Rot). In diesem Falle wird in einer weiteren Schleife der Toleranzbereich eingeschränkt und erneut

untersucht. Im nächsten Schritt werden auf Basis einer Monte Carlo Simulation 1000 verschiedene Designvariationen innerhalb des Toleranzbereiches erstellt. In jedem der Variationen wird die Verschiebung der Gesamteyebox oder des virtuellen Bildes über ein Ray Tracing des Zentralstrahls bestimmt und zu einer statistischen Auswertung zusammengefasst.

Nach dem in Abb. 2.6 gezeigten Prinzip kann die toleranzbedingte Verschiebung der Gesamteyebox bzw. des virtuellen Bildes im Designprozess des HUDs als Vorhalt der Gesamteyebox und des Blickfeldes entsprechend berücksichtigt werden.

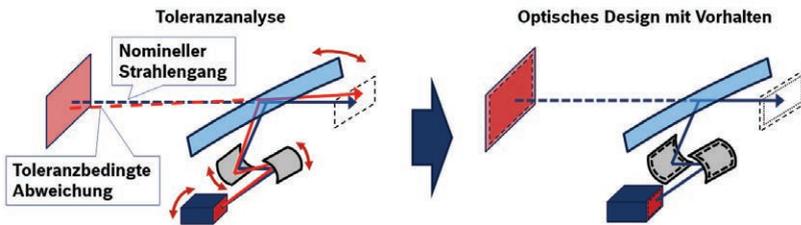


Abbildung 2.6: Prinzip zum Ausgleich toleranzbedingter Abweichungen der Position des virtuellen Bildes und der Gesamteyebox. In der Toleranzanalyse werden zu erwartende Abweichungen simulativ bestimmt (links). Durch entsprechende Vorhalte in der Dimensionierung der HUD-Elemente kann die zu erwartende Abweichung kompensiert werden (rechts).

Um den Vorhalt der Spiegelgrößen zu bestimmen, können Blickfeld und Gesamteyebox im invertierten Design vergrößert und die daraus resultierenden Spiegelflächen simulativ bestimmt werden. Es besteht prinzipiell die Möglichkeit, die verschiedenen Designvariationen einzeln zu untersuchen und die jeweils genutzte Spiegelfläche zu ermitteln, wodurch in Summe der notwendige Vorhalt ermittelt werden

kann. Dieses Verfahren erfordert einen hohen Analyseaufwand. Aus der ermittelten Verschiebung der Eyebox und der virtuellen Leinwand kann auch die damit verbundene Änderung des Look Down Angles bzw. des Look Over Angles abgeleitet werden.

Das in Abb. 2.4 dargestellte Design wurde analog zum vorigen Kapitel hinsichtlich des EB-Drifts bei Variation der Lage des Gesamtsystems und der einzelnen Elemente um $\pm 0,2$ mm bzw. $\pm 0,2^\circ$ untersucht. Es handelt sich dabei um das Design eines in Kap. 5.3 vorgestellten Frontscheiben-Prototyps. 98 % der Variationen zeigten eine Abweichung des Zentralstrahls von unter 10,1 mm in x- und 10,0 mm in y-Richtung.

Die virtuelle Leinwand verschob sich in x- um 36,2 mm und in y-Richtung um 39,2 mm, was im untersuchten Design mit einer Leinwanddistanz von 5 m zu einer Erhöhung des notwendigen Blickfeldes von $10^\circ \times 3,5^\circ$ auf $10,8^\circ \times 4,4^\circ$ führt. Die Gesamteyebox von 140 mm \times 50 mm vergrößert sich an den Rändern jeweils um den Betrag der auftretenden Verschiebung. Durch diese notwendigen Vorhalte lassen sich in der invertierten Simulation die in Tab. 2.2 zusammengefassten Vorhalte für die Größen der HUD-Elemente bestimmen. Die vergrößerte Gesamteyebox resultiert in einer Vergrößerung der Spiegel der abbildenden Optik, während die Displaygröße erhalten bleibt. Das zusätzliche Blickfeld kann durch eine Vergrößerung des Displays und der Spiegel abgedeckt werden. Alternativ kann das System mit einer höheren Vergrößerung ausgelegt werden, durch die das Display auf eine größere virtuelle Leinwand abgebildet wird.

Element	Nominell	HB-Vorhalt	HB- u. VB-Vorhalt
S1	281 mm × 122 mm	+5,3 % × +13,1 %	+10,7 % × +26,7 %
S2	230 mm × 80 mm	+4,8 % × +7,5 %	+10,9 % × +22,5 %
S3	201 mm × 41 mm	+4,5 % × +17,1 %	+11,9 % × +26,8 %
Display	68 mm × 41 mm	-	+8,8 % × +29,3 %

Tabelle 2.2: Vergrößerung der HUD-Elemente des Designs aus Abb. 2.4 zur Kompensation von toleranzbedingten Verschiebungen der Gesamteyebox (HB) und des virtuellen Bildes (VB). Die Angaben beziehen sich auf horizontal × vertikal.

2.2.3 MESSDATENBASIERTE SIMULATION VON SPIEGELELEMENTEN

Bei der Herstellung der Spiegeloptiken nach dem in der Simulationssoftware erstellten Design ergeben sich Abweichungen von der gewünschten Form. Der Hersteller kann beispielsweise $40\ \mu\text{m}$ als Betragssumme der maximal auftretenden Abweichung in positiver und negativer Richtung (Peak to Valley) garantieren. Dieser Wert wird über die komplette Fläche des Spiegels bestimmt. Zusätzlich muss eine zulässige Abweichung auf kleineren Flächenelementen auf dem Spiegel definiert werden, um beispielsweise sinusförmige Modulierungen der Oberflächenform zu erfassen. Für eine solche Abweichung ist noch kein Standard definiert und führt zu großen Unterschieden in der Spiegelqualität bei verschiedenen Herstellern.

Um die optische Qualität eines labortechnisch aufgebauten Prototyps mit hergestellten Freiformspiegeln einschätzen zu können, müssen die Ursachen der Verschlechterung der Abbildungseigenschaften identifiziert werden. Welcher Anteil dabei auf die ungenauen Spiegelformen zurückzuführen ist, kann bestimmt werden, indem die Oberflächen der hergestellten Spiegel vermessen und wieder zurück ins optische Design importiert werden.

Eine dafür entwickelte Methodik wird im Anhang in Kap. A.1.2 auf S. 225 beschrieben. In einem Beispielsystem vergrößert sich dabei die Spotgröße bedingt durch die Formabweichungen der abbildenden Spiegel von $8,6 \mu\text{m}$ auf $196,5 \mu\text{m}$.

2.3 NICHTSEQUENTIELLE METHODEN

In der nichtsequentiellen Simulation wird eine Lichtquelle unabhängig von Aperturen des Systems definiert. Die abgehenden Lichtstrahlen treffen in beliebiger Reihenfolge auf die optischen Elemente und können dabei Doppelreflektionen erfahren oder gestreut werden. Es können damit auch ausgedehnte Lichtquellen simuliert oder Elemente wie Mikrolinsenarrays mit eingebunden werden, welche das Lichtbündel in verschiedene Kanäle zerlegen.

Im konventionellen Designprozess von HUD-Systemen wird im Wesentlichen auf sequentielle Simulationsansätze zurückgegriffen. Eine Ausnahme bildet die Simulation von einstrahlendem Sonnenlicht. Im Folgenden werden nichtsequentielle Methoden vorgestellt, die Optimierungen und weiterführende Untersuchungen der Head-up-Optiken ermöglichen.

2.3.1 BILDGEBEREINHEIT MIT ABBILDUNGSOPTIK

Um das Gesamtsystem des HUDs simulieren zu können, werden die aus dem sequentiellen Designansatz stammenden Elemente in die nichtsequentielle Simulation übertragen. Nichtsequentielle Elemente wie Streuscheiben, Mikrolinsenarrays oder ausgedehnte Lichtquellen bzw. Ray Files können hier hinzugefügt werden. Die Auswertung der Simulation erfolgt über Detektorflächen, welche die Verteilung und die Menge der auftreffenden Lichtstrahlen beschreiben.

Es können damit beispielsweise Aussagen über die Homogenität der Gesamteyebboxausleuchtung oder die Effizienz des Systems getroffen werden. Die Effizienz stellt den Anteil des von der Lichtquelle abgestrahlten Lichts dar, der die Gesamteyebbox erreicht. Die Bildgebereinheit muss prinzipiell in der Lage sein, diese komplett mit Licht zu bedienen, um dem Auge die Teilbilder in jeder Position anbieten zu können. Gleichzeitig darf das einzelne Teilbild zu jedem Zeitpunkt nur in einer nachgeführten Eyebbox angeboten werden, welche möglichst abgegrenzt sein sollte, um Überschneidungen zwischen den beiden Teilbildern zu verhindern.

Diese Anforderung setzt eine exakt angepasste Abstrahlung am Display der Bildgebereinheit voraus, welche die Anforderungen von konventionellen HUDs deutlich übersteigt.

2.3.2 EYEBBOXAUSLEUCHTUNG BEI Z-SHIFT DES BEOBACHTERS

Durch die Simulation des Gesamtsystems im nichtsequentiellen Modus kann beispielsweise das Systemverhalten bei einer Bewegung des Beobachterauges zur Frontscheibe hin oder weiter von ihr weg untersucht werden (z-Shift).

Beim Designen eines Head-up Displays wird von einem festen Abstand des Beobachterauges von der Windschutzscheibe ausgegangen. Die Abstrahlung eines jeden Pixels des Displays der Bildgebereinheit wird derart geformt, dass das Pixel von der schmalen Eyebox aus gesehen werden kann. Das bedeutet der Abstrahlkegel leuchtet die Eyebox möglichst ohne den Bereich zu überschreiten aus. Die dafür notwendige Form des Abstrahlkegels ist in der Regel pyramidenförmig.

Bewegt sich der Beobachter in z-Richtung, so werden die von den Displaypunkten generierten Eyeboxen am Ort des Auges nicht mehr korrekt überlagert. Dies führt dazu, dass der Beobachter unter Umständen nicht mehr aus jeder Position innerhalb des Eyeboxbereichs den kompletten Bildinhalt sehen kann. Das Problem kann beispielsweise auftreten, wenn die Position des Fahrersitzes verstellt wird.

Ein hier simulativ entwickelter Ansatz zur Kompensation dieses Effektes ist die Nachführung der Lichtquelle der Bildgebereinheit mit der z-Position des Beobachterauges.

Das Design eines autostereoskopischen Head-up Displays ist in Abb. 2.7 dargestellt. Die Bildgebereinheit basiert auf einer LED-Hinterleuchtung und einem Set aus zwei Mikrolinsenarrays zur Formung der Abstrahlkegel am Display. Das Display selbst wird dann über einen Freiformspiegel und die Windschutzscheibe abgebildet.

In Abb. 2.8 ist die Simulation der Ausleuchtung der einzelnen Eyebox für ein Auge dargestellt. Die verschiedenen Bilder zeigen dabei die Ausleuchtung durch verschiedene Stellen des Displays: oben links, oben rechts, Displaymitte, unten links, unten rechts (Bilder von links nach rechts). Die erste Zeile stellt die Ausleuchtung bei einem Beobachter im Designabstand dar. Die Eyebox wird dabei aus jedem Punkt des Displays gleichmäßig beleuchtet.

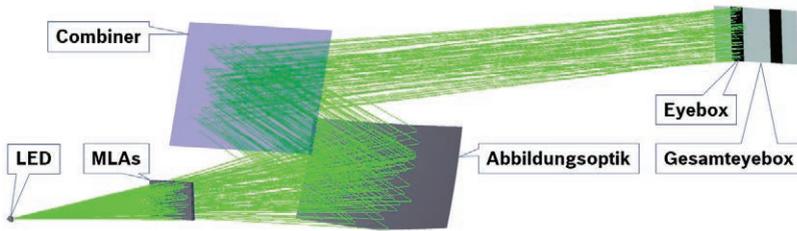


Abbildung 2.7: Design eines Head-up Displays mit einer auf Mikrolinienarrays basierenden Bildgebereinheit.

Die zweite Zeile zeigt die Ausleuchtung bei einem um 8 cm erhöhten Abstand zwischen Beobachterauge und Windschutzscheibe. Während der zentrale Punkt des Displays noch aus jeder Position innerhalb der Eyebox gesehen werden kann, driften die Eyeboxen für die Randbereiche des Displays von der Zielposition weg. Ohne eine Kompensation kann jetzt nicht mehr der gesamte Bildinhalt aus den Randbereichen der Eyebox gesehen werden. Die letzte Zeile zeigt die Ausleuchtung bei einer Kompensation durch eine Verschiebung der LED. Die LED wurde dazu um 3 cm näher in Richtung der Displaymitte verschoben (ursprünglicher Abstand: 26 cm). Wie in der Abbildung erkennbar, kann der Drift der Eyeboxbereiche durch die Verschiebung der LED weitestgehend kompensiert werden.

Die vorgestellte Simulationstechnik bewertet die Ausleuchtung der Eyeboxen im Gesamtsystem des HUDs. Sie ermöglicht damit eine Anpassung der Bildgeberelemente zur optimalen Formung der Abstrahlung am Display und untersucht das Systemverhalten in speziellen Anwendungsfällen wie dem hier beschriebenen Beispiel des verschobenen Betrachterabstandes. Auf Basis dieser Untersuchungen wurde ein Patententwurf beim Deutschen Patentamt eingereicht [32].

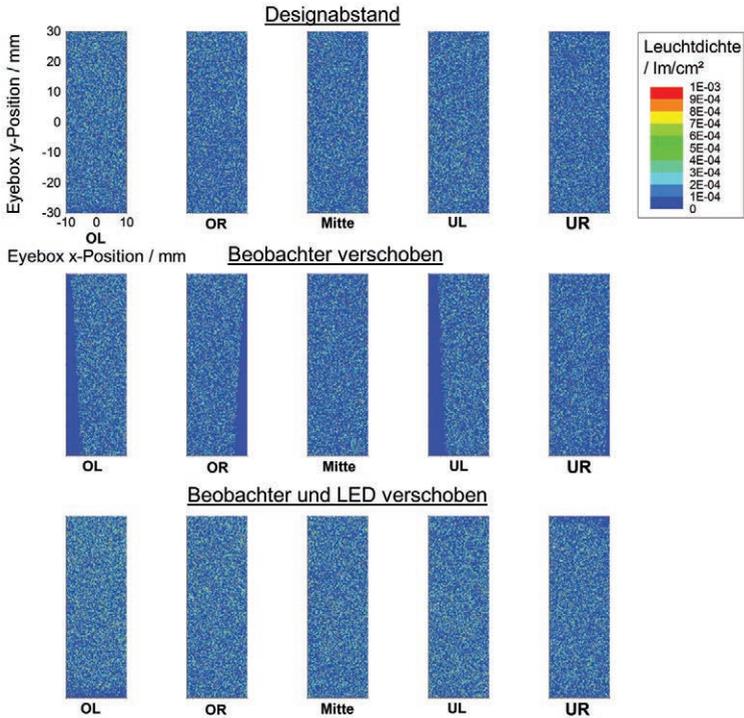


Abbildung 2.8: Ausleuchtung der Eyebox des rechten Auges bei z-Shift des Beobachterauges. Die Darstellung zeigt, wie verschiedene Stellen des Displays die Eyebox ausleuchten. Das Auge befindet sich jeweils im Zentrum der Ausschnitte. Oben: Betrachterauge im Designabstand, Mitte: Betrachterauge um 80 mm verschoben ohne LED-Nachführung, Unten: Betrachterauge um 80 mm verschoben mit nachgeführter LED zur Kompensation. Die Bilder von links nach rechts zeigen die Ausleuchtung durch verschiedene Stellen des Displays: Oben Links, Oben Rechts, Displaymitte, Unten Links, Unten Rechts.

2.3.3 EINFÜHRUNG EINES BEOBACHTERS

Auch durch eine sehr gleichmäßig ausgeleuchtete und scharf abgegrenzte Eyebow für das dem einen Auge angebotene Teilbild ist noch nicht sichergestellt, dass das Auge das Bild mit gleichmäßiger Helligkeit wahrnimmt. Um das wahrgenommene Bild zu simulieren, wurde in einem nichtsequentiellen Ansatz das Auge eines Beobachters simulativ integriert. Es wurde dabei als Kombination einer idealen Linse mit einer Apertur von 8 mm und einer ebenen Netzhaut (Retina) modelliert. Das Auge ist idealisiert, wodurch das Augenmodell selbst keine Abbildungsfehler erzeugt. Alle in der Abbildung auf der Retina resultierenden Abbildungsfehler sind damit auf das optische System des HUDs zurückzuführen.

In der Abbildung sind die Homogenität des Bildes und die entstehende Verzeichnung erkennbar. Das Auge kann auf verschiedene Distanzen fokussiert und der Effekt auf die Abbildung des HUD-Inhaltes beobachtet werden. Das entwickelte Verfahren wurde in einer im Rahmen dieser Arbeit vorgenommenen Veröffentlichung beschrieben [30]. Ein Beispiel eines simulierten Bildes auf der Netzhaut findet sich in Abb. 5.26 auf S. 143.

In Abb. 2.9 sind zusammenfassend verschiedene, rot eingefärbte Ebenen im HUD-System dargestellt, in denen das System simulativ evaluiert wird. Die Displayfläche dient beim optischen Design der Abbildungsoptik als Bildebene der simulierten Objektpunkte aus dem virtuellen Bild mit zu minimierenden Spotgrößen. Bei der simulativen Auslegung der PGU muss dort auf eine gleichmäßige Ausleuchtung geachtet werden. Das von der PGU erzeugte Bild wird umgekehrt auch auf die virtuelle Leinwand abgebildet, um dort und innerhalb der Gesamteyebow toleranzbedingte Abweichungen in der Positionierung zu untersuchen.

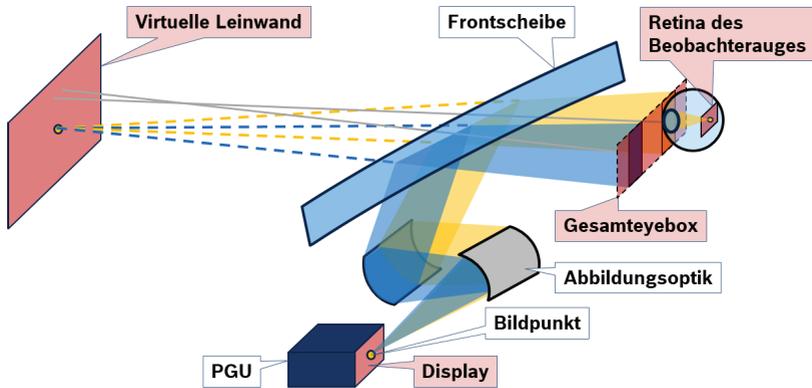


Abbildung 2.9: Verschiedene Ebenen zur Analyse des HUD-Systems im simulativen Designprozess eines HUD-Systems. Wesentliche Detektor- und Abbildungsebenen sind das Display, die virtuelle Leinwand, die Gesamteyebox und die Retina des Beobachterauges.

Das Design wird außerdem optimiert, um innerhalb der Gesamteyebox abgegrenzte Eyebboxes definierter Breite zu realisieren. Auf einer Detektorfläche als Retina eines Beobachterauges kann unter anderem die Homogenität des virtuellen Bildeindrucks evaluiert werden.

Die vorgestellte Simulationsmethodik stellt eine Grundlage zur Auslegung von autostereoskopischen HUDs mit hohen Anforderungen an die Abstrahlcharakteristik dar. Diese Anforderungen werden bereits in der sequentiellen Simulation zur Abbildung des virtuellen Bildes berücksichtigt. Durch die nichtsequentiellen Methoden unter Simulation des Gesamtsystems wird eine geeignete Eyeboxformung mit homogenem Bildeindruck ermöglicht. Die in den folgenden Kapiteln im Rahmen der Konzept- und Prototypenentwicklungen vorgestellten Systeme wurden auf Basis dieser Methodik entwickelt.

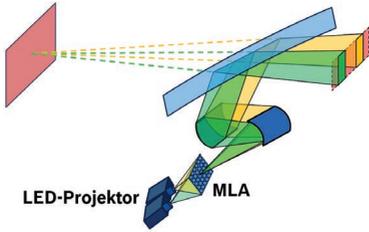
KAPITEL 3

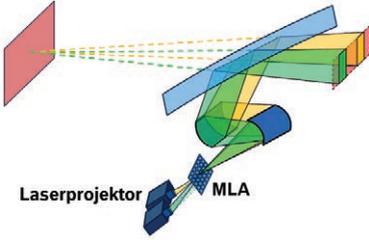
KONZEPTANALYSE UND MESSMETHODIK

Mit Hilfe der in Kap. 2 vorgestellten Methoden wurden neuartige, autostereoskopische HUD-Konzepte entwickelt und sowohl simulativ, als auch in labortechnischen Aufbauten untersucht. Im Folgenden wird ein Überblick über auf verschiedenen Technologien basierende Ansätze gegeben und es werden die wesentlichen Vor- und Nachteile herausgestellt, bevor in den darauf folgenden Kapiteln 4, 5 und 6 näher auf die Untersuchungen der einzelnen Konzepte eingegangen wird.

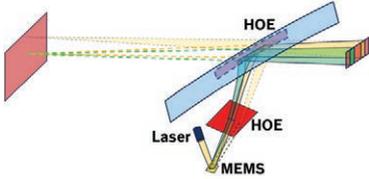
3.1 AUTOSTEREOSKOPISCHE HUD-KONZEPTE

In Tabelle 3.1 finden sich Prinzipskizzen, sowie wesentliche Vor- und Nachteile verschiedener, im Rahmen dieser Arbeit entwickelter, autostereoskopischer Konzepte.

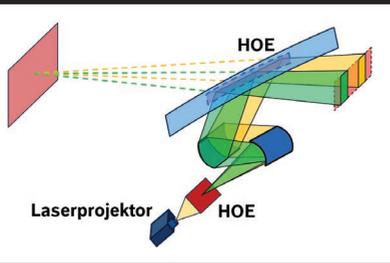
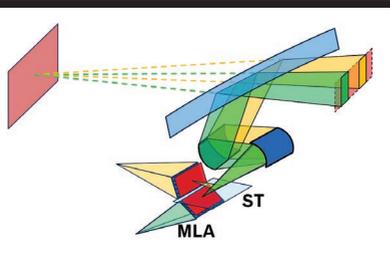
KONZEPT / VORTEILE	BESCHREIBUNG / NACHTEILE
 <p>LED-Projektor MLA</p>	<p>LED basierte DLP-Projektion auf MLA (siehe Kap. 4.2)</p>

<p>+ Hohe Helligkeit + Hohe Bildqualität</p>	<p>- Gesamtnachführung der PGU - Zwei Projektoren mit teuren DLP-Chips</p>
<p>Bei einem Projektionsansatz der auf einem LED-Beamer mit DLP-Chip basiert, beruht die autostereoskopische Realisierung auf der Verwendung zweier Projektoren mit einer gemeinsamen Projektionsfläche, die in schmale Raumwinkel abstrahlt. Die Projektoren strahlen in unterschiedlichen Winkeln auf die Streufläche, wodurch jeweils Eyeboxen an unterschiedlichen Stellen der Gesamteyebox erzeugt werden. Eine solche Projektionsfläche kann als ein Mikrolinsenarray realisiert sein, das die Bildpunkte refraktiv in einen schmalen Raumwinkel aufweitet. Aufgrund der hohen Transmission dieser Streufläche, sowie der Konzentration des Lichtes in die schmale Eyebox, sind extrem hohe Helligkeiten erreichbar. Eine hohe Bildqualität ist bei angepassten Mikrolinsen ebenfalls möglich.</p> <p>Durch die objektivseitig vorgegebene Abbildung des DLP-Chips auf die Projektionsfläche wird die Nachführung der Eyeboxen durch eine Drehung der kompletten Bildgebereinheit realisiert. Zudem ist die Realisierung mit zwei DLP-Projektoren kostenintensiv, da DLP-Chips in notwendiger Qualität derzeit nur von der Firma <i>Texas Instruments</i> angeboten werden.</p>	
 <p>Laserprojektor MLA</p>	<p>Flying Spot Laserprojektion auf MLA (siehe Kap. 4.3)</p>
<p>+ Hohe Helligkeit + Großer Farbraum</p>	<p>- Gesamtnachführung der PGU - Specklereduktion herausfordernd - Zwei Projektoren notwendig</p>
<p>Eine weitere auf einer MLA-Projektionsfläche basierende Methode ist die Verwendung eines laserbasierten Flying Spot Projektors. Bei entsprechen-</p>	

der Auslegung der Mikrolinsen und des Projektionssystems werden die Laserstrahlen des Projektors aufgeweitet, ohne die Phasenfronten zu durchmischen. Der Beobachter schaut direkt in den aufgeweiteten Strahl eines jeden zeitsequentiell aufgebauten Bildpunktes und nimmt daher keine störenden Speckleeffekte wahr. Die Strahlaufweitung unter Vermeidung von Streueffekten ist aufgrund enger Toleranzen und der notwendigen hohen Oberflächenqualität der optischen Elemente technisch herausfordernd. Aufgrund der Verwendung von Lasern ist ein großer Farbraum darstellbar. Systeme mit ähnlichem Ansatz werden beispielsweise von der Firma *MicroVision* angeboten.

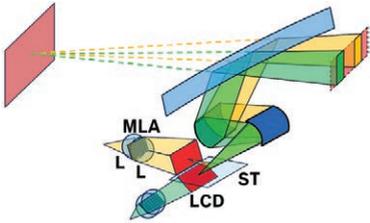
	<p>Flying Spot Laserprojektion auf HOE entwickelte Patente: [33, 34] (siehe Kap. 4.4)</p>
<p>+ Geringer Bauraum + Hohe Helligkeit + Einzelner Projektor</p>	<p>- Enge Justagetoleranzen - Geteilte Auflösung für die beiden Augen</p>
<p>Die Verwendung von Laserlicht im Flying Spot Ansatz ermöglicht die Integration von Hologrammen. Die Projektionsfläche kann daher holographisch umgesetzt sein und weitet den Strahl ähnlich den Mikrolinsen auf. Ein zusätzliches, in der Frontscheibe des Fahrzeugs eingebettetes Hologramm erfüllt eine abbildende optische Funktion, durch die eine virtuelle Leinwanddistanz von einigen Metern realisiert werden kann. Durch die Auslagerung der Optik in die Frontscheibe kann das restliche System in geringem Bauraum realisiert werden.</p> <p>Im autostereoskopischen Ansatz müssen einzelne Punkte der holographischen Projektionsfläche in unterschiedliche Richtungen strahlen, um verschiedene Eyeboxen zu bedienen. Dazu kann das Hologramm pixelweise mit abwechselnden Pixel für linkes und rechtes Auge aufgenommen werden.</p>	

Die Nachführung erfolgt durch eine Drehung der Bildgebereinheit. Dieses Konzept wurde im Rahmen dieser Arbeit rein simulativ untersucht.

	<p>Laserbasierte DLP-Projektion auf HOE entwickelte Patente: [35, 36] (siehe Kap. 4.5)</p>
<p>+ Geringer Bauraum + Ermöglicht effektive Specklereduktion + Hohe Helligkeit</p>	<p>- Im Grundkonzept zwei Projektoren notwendig - Hologrammherstellung technisch herausfordernd</p>
<p>Anstatt eines Flying Spot Projektors kann ein laserbasierter DLP-Projektor eingesetzt werden, um eine holographische Projektionsfläche zu beleuchten. Im Gegensatz zur Phasenfront erhaltenden Aufweitung der Laserstrahlen werden in diesem Falle Speckle erzeugt, die allerdings durch verschiedene Methoden in der Hinterleuchtungseinheit des DLP-Chips unterdrückt werden können. Das Konzept ermöglicht die Bauraum reduzierende Integration eines Frontscheibenhologramms. Für die autostereoskopische Umsetzung wird eine pixelweise geschriebene Projektionsfläche mit abwechselnden Pixeln für linke und rechte Eyebbox benötigt. Alternativ kann die Projektionsfläche von einem zweiten Projektor aus einer abweichenden Richtung bespielt werden.</p>	
	<p>LCD-HUD mit MLA-Fläche und Strahlteiler entwickeltes Patent: [32] (siehe Kap. 5.2, 5.3)</p>

<p>+ Hohe Bildqualität + Verfügbarkeit automotivetauglicher Elemente</p>	<p>- Potentiell im Bild sichtbare Mikrolinsenstruktur - Bauraumintensive Bildgebereinheit - Kosten für 2 LCDs als Bildgeber</p>
--	---

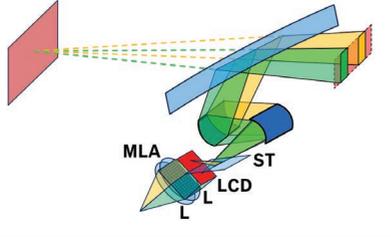
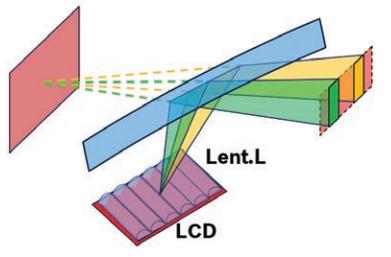
Durch eine angepasste Strahlformung in enge Raumwinkel kann eine LCD-Zelle hinterleuchtet werden, um eine schmale Eyebox zu generieren. Die notwendigen, engen Abstrahlrichtungen am Display werden in diesem Konzept mit einem hinter der LCD befindlichen Mikrolinsenarray erzeugt. Da eine LCD-Zelle unter Automotivebedingungen nicht ausreichend schnell arbeitet, wird ein zweites Display mittels eines Strahlteilers (ST) überlagert.

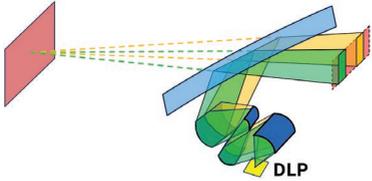
	<p>LCD-HUD mit MLA-Hinterleuchtung und Strahlteiler entwickeltes Patent: [37] (siehe Kap. 5.2, 5.4)</p>
---	--

<p>+ Hohe Bildqualität + Verfügbarkeit automotivetauglicher Elemente + Nachführung mit mechanischer Blende</p>	<p>- Bauraumintensive Bildgebereinheit - Kosten für 2 LCDs als Bildgeber</p>
--	--

Um im vorigen Konzept ein Durchscheinen der Mikrolinsenstruktur durch die LCD-Zelle zu vermeiden, kann die Hinterleuchtung derart ausgelegt sein, dass sich der schmale Abstrahlwinkel der Displaypunkte durch die Aperturen der verwendeten Elemente ergibt. Die Beleuchtung wird durch ein Mikrolinsenarray mit zusätzlichen Linsen (L) in einigem Abstand zum Display homogenisiert. Das Mikrolinsenarray befindet sich nicht mehr in der Nähe der Abbildungsebene.

Die Nachführung kann durch die Integration von verschiebbaren Blenden von geringer Masse realisiert werden, die sich direkt vor den Mikrolinsen befinden. Der Lichtverlust durch die Blende muss durch eine ausreichend helle Lichtquelle kompensiert werden.

	<p>Einzel-LCD-HUD mit Strahlteiler entwickeltes Patent: [38] (siehe Kap. 5.2.5)</p>
<p>+ Hohe Bildqualität + Verfügbarkeit automotivetauglicher Elemente</p>	<p>- Hohe Vergrößerung notwendig - Auflösungsverlust durch Displayaufteilung</p>
<p>Da in den vorigen beiden Konzepten die Verwendung zweier LCD-Zellen zu erhöhtem Bauraum und erhöhten Kosten führt, kann in einem alternativen Konzept ein einzelnes Display verwendet werden, das mit einem Strahlteiler in Teilbereiche untergliedert wird, die optisch überlagert werden. Die Abbildungsoptik vergrößert die LCD-Hälften entsprechend stärker, um das gewünschte Blickfeld abzudecken. Für jedes Auge steht dann die halbe Displayauflösung zur Verfügung.</p>	
	<p>Direkt abbildendes LCD-HUD mit Lentikularlinsen entwickeltes Patent: [39] (siehe Kap. 5.5)</p>

<p>+ 3D mit nur einem Bildgeber + Geringe Latenzzeit durch rein elektronische Nachführung + Geringer Bauraum</p>	<p>- Anfälligkeit für Störlicht und Doppelbild - Hohe Auflösung erforderlich für Lentikularlinsenprinzip - Kurze virtuelle Leinwanddistanz</p>
<p>Ein Ansatz mit rein elektronischer Nachführung besteht in der Kombination einer LCD-Zelle mit Lentikularlinsen, durch die einzelne Pixel des Displays nur noch zu bestimmten Positionen innerhalb der Gesamteyebow strahlen. Das jeweilige Teilbild wird auf diejenigen Pixel aufgeschaltet, die aus der zugehörigen Augenposition heraus gesehen werden. In diesem Aufbau wird das Display direkt über die Frontscheibe eingespiegelt. Das System erfordert spezielle Gegenmaßnahmen gegen die Einkopplung von störenden Sonnenlichtreflektionen, sowie gegen die Entstehung von Doppelbildern an der Frontscheibe.</p>	
	<p>Direktabbildung eines Mikrodisplays (DLP / LCoS) entwickelte Patente: [40, 41] (siehe Kap. 6.1)</p>
<p>+ Hohe Bildqualität + Kein Objektiv notwendig</p>	<p>- Hohe Vergrößerung notwendig - Toleranzanfälligkeit</p>
<p>Bei Verwendung einer Abbildungsoptik mit sehr hoher Vergrößerung ist es möglich, ein Mikrodisplay wie beispielsweise einen LCoS- oder einen DLP-Chip in hoher Abbildungsqualität direkt auf die virtuelle Leinwand abzubilden. Dazu ist in der Regel eine hohe Anzahl von Freifromspiegeln notwendig, wodurch das System anfälliger für Toleranzen wird.</p>	

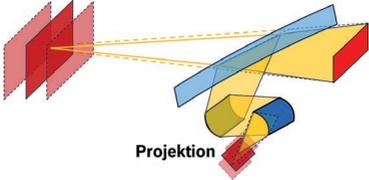
	<p>Volumetrisches HUD (variable Bilddistanz durch bewegtes Display, siehe Kap. 6.2)</p>
<p>+ Natürlicher 3D-Eindruck + Kein Übersprechen</p>	<p>- Zeitsequentieller Aufbau technisch herausfordernd - Hohe Anforderungen an die Abbildungsoptik</p>
<p>Beim volumetrischen Ansatz wird die Projektionsfläche der Bildgebereinheit in hoher Frequenz bewegt. In unterschiedlichen Abständen zur Abbildungsoptik wird die Fläche in unterschiedlich weit entfernte, virtuelle Leinwandebenen abgebildet, wodurch sich die Leinwand in dieser Frequenz durch den Raum bewegt. Die Projektionsfläche kann stufenweise, kontinuierlich oder schwingend bewegt werden. Die Abbildungsoptik muss eine ausreichende Abbildungsqualität in allen Entfernungen gewährleisten.</p> <p>Die Bildpunkte werden jeweils für einen kurzen Moment erzeugt, während sich die Leinwand in der gewünschten Entfernung befindet. Eine technische Herausforderung liegt darin, in dieser kurzen Zeit ausreichend Licht zur Verfügung zu stellen. Die Raamtiefe wird durch Variation der Leinwanddistanz erzeugt, ohne getrennte Teilbilder zu generieren. Es treten daher weder Übersprechen, noch der Konflikt zwischen Akkommodation und Konvergenz auf.</p>	

Tabelle 3.1: Übersicht über verschiedene autostereoskopische HUD-Konzepte.

3.2 EVALUATION VON PROTOTYPEN

Im folgenden Abschnitt werden Kenngrößen autostereoskopischer HUD-Systeme und damit verbundene Messmethoden vorgestellt, die als Grundlage der Evaluation verschiedener, prototypischer Aufbauten dienen.

Virtuelle Leinwanddistanz

Zur Bestimmung des Abstandes der virtuellen Leinwand zum Beobachter werden einzelne, leuchtende Pixel im Bild dargestellt. Eine Kamera wird am Ort des Beobachters positioniert und nimmt das virtuelle Bild näherungsweise ins Unendliche fokussiert auf. Anschließend wird die Kamera parallel zum virtuellen Bild verschoben und eine erneute Aufnahme vorgenommen. Durch Kenntnis der Fokusslänge und der Chipgröße der verwendeten Kamera lassen sich die Verschiebung des abgebildeten Punktes auf dem Sensorchip d_{Chip} und der Abstand der virtuellen Leinwand (VSD) aus der Verschiebung des aufgenommenen Pixels im Kamerabild über Triangulation nach folgenden Formeln berechnen. Δp ist darin der Pixelversatz des Punktes im aufgenommenen Bild, B_{Chip} die Chipbreite, x_{Px} die Pixelzahl des Chips in der Breite, f die Fokusslänge und K_{Shift} die Verschiebelänge der Kameraposition:

$$d_{Chip} = \frac{\Delta p \cdot B_{Chip}}{x_{Px}} \quad (3.1)$$

$$VSD = \frac{f \cdot K_{Shift}}{d_{Chip}} \quad (3.2)$$

Blickfeld

Das in einem Prototypen nutzbare Blickfeld (FOV, Field of View) hängt vom Abstand zwischen der Leinwandebene und der Bildebene ab. In Abb. 3.1 ist der Zusammenhang geometrisch veranschaulicht. Die obere Skizze zeigt den Fall positiver horizontaler Parallaxe, durch die Objekte hin zu größeren Entfernungen verschoben werden. Da die Teilbilder auf der virtuellen Leinwand dargestellt werden, wird der nutzbare Bereich des Blickfeldes perspektivisch durch die äußeren Randpositionen in der Gesamt-eyebox beschränkt.

Im Falle einer in der unteren Skizze veranschaulichten, negativen horizontalen Parallaxe mit sich überkreuzenden Sehachsen limitieren ebenfalls die Randpositionen das Blickfeld. Im Abstand x_0 fällt das nutzbare Blickfeld auf 0° ab.

Aus den geometrischen Beziehungen ergibt sich für x_0 :

$$x_0 = VSD - \frac{VSD^2 \cdot \tan\left(\frac{FOV_0}{2}\right)}{VSD \cdot \tan\left(\frac{FOV_0}{2}\right) + \frac{EB}{2}} \quad (3.3)$$

Das Blickfeld in Abhängigkeit des Abstandes x des Beobachters zur Bildebene berechnet sich zu:

Für $0 \leq x \leq x_0$:

$$FOV(x) = 0 \quad (3.4)$$

Für $x_0 < x \leq VSD$:

$$FOV(x) = 2 \cdot \arctan\left(\tan\left(\frac{FOV_0}{2}\right) + \frac{EB}{2 \cdot VSD} - \frac{EB}{2 \cdot x}\right) \quad (3.5)$$

Für $x > VSD$:

$$FOV(x) = 2 \cdot \arctan\left(\frac{EB}{2 \cdot x} - \frac{EB}{2 \cdot VSD} + \tan\left(\frac{FOV_0}{2}\right)\right) \quad (3.6)$$

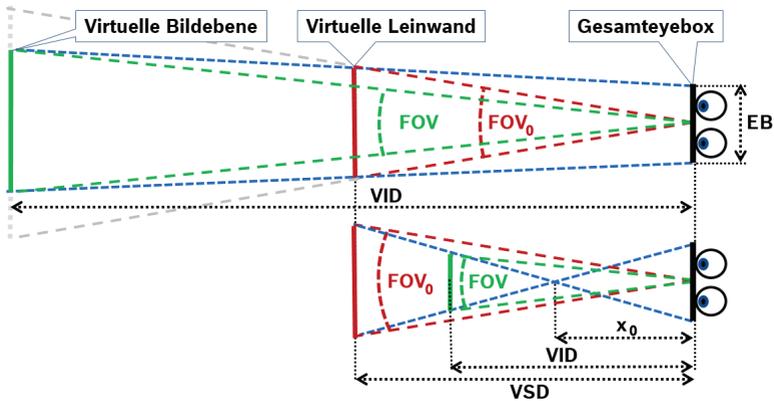


Abbildung 3.1: Geometrische Veranschaulichung des nutzbaren Blickfeldes in unterschiedlichen Bildabständen bei fester Leinwandebene. Oben: Beschränkung des nutzbaren Blickfeldes bei positiver horizontaler Parallaxe (blau). Unten: Beschränkung bei negativer horizontaler Parallaxe (blau). Das nutzbare Blickfeld bei Verschiebung der Bildebene nimmt jeweils ab.

Der Verlauf des nutzbaren Blickfeldes bei variabler Bildentfernung für ein System mit einer Leinwanddistanz von 5 m ist in Abb. 3.2 dargestellt. Ohne eine stereoskopische Verschiebung der Teilbilder lässt sich das volle, von der virtuellen Leinwand eingenommene Blickfeld von 9° nutzen. Zu kürzeren Entfernungen hin nimmt der nutzbare Anteil schneller ab als zu größeren Entfernungen.

Die Messung des Blickfeldes (FOV) in prototypischen Aufbauten bezieht sich auf das von der virtuellen Leinwand eingenommene Blickfeld. Sie erfolgt durch Darstellung einer weißen Fläche maximaler Größe und Vermessung der Breite bzw. Höhe des Bildes mittels einer Referenzskala, die im Abstand der virtuellen Leinwand aufgestellt wird. Mit Hilfe einer Kamera wird aus der Beobachterposition heraus

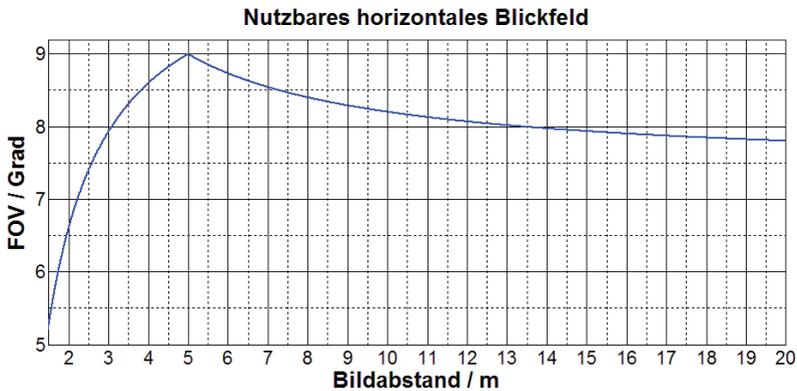


Abbildung 3.2: Nutzbares, horizontales Blickfeld bei stereoskopischer Verschiebung der Bildinhalte in verschiedene Distanzen. Die Kurve wurde für ein System mit 9° horizontalem Blickfeld, 140 mm Gesamteyebboxbreite und einer Leinwanddistanz von 5 m berechnet.

ein Bild dieser Anordnung aufgenommen und das Blickfeld geometrisch aus der aufgenommenen Überlagerung der weißen Fläche mit der Referenzskala berechnet.

Leuchtdichte

Die Leuchtdichte ist ein Maß für den vom menschlichen Auge wahrgenommenen Helligkeitseindruck einer leuchtenden Fläche und berechnet sich zu [42]:

$$LD = \frac{d^2\Phi}{\cos(\alpha)d\Omega dA} \quad (3.7)$$

Darin beschreibt Φ den Lichtstrom, der in das Raumwinkelement $d\Omega$ von einem Flächenelement dA abgestrahlt wird. Die Flächennormale des Flächenelements ist dabei um den Winkel α gegenüber

der Abstrahlrichtung geneigt. Das projizierte Flächenelement beträgt dadurch $\cos(\alpha) dA$.

Messtechnisch wird die Leuchtdichte des Bildes in jeder Eyebox durch die Aufnahme einer weißen Vollfläche mit Hilfe einer Leuchtdichtekamera des Typs LMK5-1 der Firma *TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH* bestimmt. Angegeben wird das Leuchtdichtemittel über das komplette virtuelle Bild, wobei der zu erreichende Zielwert bei 10.000 cd/m^2 liegt [43].

Eyebox-Formung

Die Formung der Eyeboxen für linkes und rechtes Auge wird mit Hilfe eines Schirms an der Position der Gesamteyebbox bestimmt. Eine Leuchtdichtekamera nimmt ein Bild des von jeweils einer Eyebox beleuchteten Schirms auf, wobei ein weißes Vollbild dargestellt wird. Da beim autostereoskopischen Prinzip die Trennung der Bildinformationen zwischen den beiden Augen, sowie die Nachführung in horizontaler Richtung im Mittelpunkt stehen, werden die Zeilen des Schirmes integriert und es wird ein horizontales Schnittbild ausgewertet.

Übersprechen

Grundlage der Berechnung des Übersprechens zwischen den beiden Teilbildern (Crosstalk) sind Messungen der Leuchtdichte aus den beiden Augenpositionen (vgl. [44]). Es wird dabei aus beiden Positionen jeweils ein vollflächig weißes und ein vollflächig schwarzes Teilbild aufgenommen und die mittlere Leuchtdichte im Anzeigebereich bestimmt. Das Übersprechen in einer Augenposition berechnet sich zu [44]:

$$\chi_{3D1}(\theta) = \frac{Y_{3D2}(\theta) - Y_{3DK}(\theta)}{Y_{3D1}(\theta) - Y_{3DK}(\theta)} \quad (3.8)$$

Dabei sind χ_{3D1} das 3D-Übersprechen in der ersten Augenposition innerhalb der Eyebox, $Y_{3D2}(\theta)$ die vom Teilbild des anderen Auges stammende Leuchtdichte, $Y_{3D1}(\theta)$ die aus dem der Eyeboxposition zugehörigen Teilbild stammende Leuchtdichte und $Y_{3DK}(\theta)$ die Leuchtdichte bei Darstellungen eines schwarzen Bildes in beiden Teilbildern. Zur Bestimmung der mittleren Leuchtdichte eines Teilbildes in der untersuchten Augenposition wird das jeweils andere Teilbild als schwarze Vollfläche dargestellt. In der Literatur werden als Toleranzgrenze des Übersprechens Werte zwischen 2 % und 5 % angegeben [45, 46, 47].

Kontrast

Zur Bestimmung des Schwarz-Weiß-Kontrasts (SW-Kontrast) werden vollflächig weiße und schwarze Bilder aufgeschaltet und die jeweiligen mittleren Leuchtdichten ins Verhältnis gesetzt. Um Kontrastverhältnisse zwischen hellen und dunklen Objekten eines Bildes charakterisieren zu können, wird das in Abb. 3.3 gezeigte Testbild verwendet. Es wird dabei eine weiße Testfläche mit einer Kantenlänge von einem Fünftel der Bildhöhe bzw. -breite verwendet. Die weiße Fläche macht damit 4 % der Gesamtfläche aus.

Nach Aufnahme des Bildes mittels einer Leuchtdichtekamera wird das Bild in 25 Felder entsprechend dem weißen Testfeld unterteilt.

Als innerer 4 %-Kontrast wird das Verhältnis der mittleren Leuchtdichte der weißen Fläche mit der mittleren Leuchtdichte der umliegenden Felder gebildet. Der äußere 4 %-Kontrast berechnet sich aus dem Verhältnis des zentralen Feldes zu den äußeren Feldern des Bildes. Der innere Kontrast ähnelt dabei dem oftmals klassisch verwendeten

Schachbrettkontrast, bei dem die Testfelder ebenfalls an Hell-Dunkel-Grenzen liegen. Der im Bosch Projekt „Autostereoskopisches HUD“ geforderte Wert liegt bei $> 250 : 1$ [43]. An den äußeren 4%-Kontrast werden in HUD-Anwendungen höhere Anforderungen gestellt, da ein Postkarteneffekt vermieden werden soll, bei dem in dunkler Umgebung ein grauer Schatten des virtuellen Bildes sichtbar bleibt, der sich von der dunklen Fahrszene abhebt.

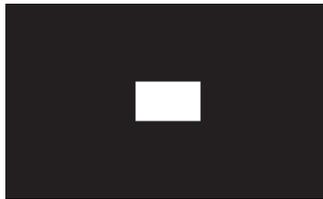


Abbildung 3.3: Testbild der Messung des 4%-Kontrasts. Die weiße Testfläche belegt ein Fünftel der Breite und Höhe des Anzeigebereichs.

Doppelbildkontrast

Bei der Abbildung über eine Frontscheibe oder einen Combiner können durch die innenseitige und außenseitige Reflektion Doppelbilder entstehen, die dem eigentlichen Bild mit leichtem Versatz überlagert sind. Sie treten im HUD-System in der Regel in vertikaler Richtung auf.

Der Doppelbildkontrast berechnet sich als das Verhältnis der mittleren Leuchtdichte des Bildes zu der des Doppelbildes. Bei der Messung wird eine horizontal verlaufende Hell-Dunkel-Stufe dargestellt und ein Leuchtdichtebild der virtuellen Abbildung aufgenommen. Durch den Bildversatz können die Leuchtdichten in schmalen horizontalen Streifen bestimmt und ins Verhältnis gesetzt werden.

Auflösung

Die Auflösung wird über die Vermessung des Systems bei Abbildung von horizontalen bzw. vertikalen Linienpaaren unterschiedlicher Raumfrequenz bestimmt, die im virtuellen Bild aufgenommen werden.

In den aufgenommenen Testbildern werden Sinusfunktionen an die Linienpaare angefittet. Der Linienpaarkontrast (LP-Kontrast) des Bildes bei der jeweiligen Raumfrequenz wird über folgende Formel bestimmt [6]:

$$\text{LP-Kontrast} = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (3.9)$$

$$= \frac{\text{Amplitude}}{\text{Offset}} \quad (3.10)$$

Die Berechnungen des LP-Kontrastes über Amplitude und Offset oder I_{max} bzw. I_{min} als Maximum und Minimum der Sinusfunktion sind äquivalent. Aus der Frequenz der gefitteten Funktion im Bild berechnet sich die zum berechneten Kontrast zugehörige Raumfrequenz auf dem Display der Bildgebereinheit. Trägt man die durch unterschiedlich breite Linienpaare bestimmten LP-Kontrastwerte über ihre Raumfrequenzen auf, so erhält man die Modulationsübertragungsfunktion (Modulation Transfer Function, MTF).

Als auflösbare Pixelgröße wird die Breite einer Linie des Linienpaares definiert, welche mit einem Kontrast von 30% übertragen werden kann.

Homogenität

Zur Bestimmung der Homogenität eines Teilbildes wird ein vollflächig weißes Bild dargestellt und aus der Beobachterposition in der Eyebox

heraus mit einer Leuchtdichtekamera aufgenommen. Das aufgenommene Bild wird in 9 Bereiche mit jeweils einem Drittel der Breite und Höhe des Anzeigebereiches unterteilt. Die Homogenität wird definiert als das Verhältnis zwischen maximal und minimal auftretender mittlerer Leuchtdichte der 9 Bereiche.

Granulation

Die Granulation des Bildes spiegelt sich in einer lokalen Inhomogenität wieder, die sich unter Umständen über größere Bildbereiche ausmitteln. Sie kann beispielsweise durch die Verwendung einer rauen Projektionsfläche oder durch die ungewollte Ausprägung feiner Strukturen im vollflächigen Bild entstehen.

Messtechnisch wird die Granulation bestimmt, indem ein vollflächig weißes Bild mit einer Leuchtdichtekamera aufgenommen wird und 9 über die Bildfläche verteilte Messfelder von 20×20 Pixeln ($n = 400$) untersucht werden. Die Aufnahme erfolgt im virtuellen Bild. Die Standardabweichung σ berechnet sich über den Mittelwert \bar{x} der Pixelintensitäten x_i zu [48]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.11)$$

Die Granulation eines Messfeldes bestimmt sich durch das Verhältnis der Standardabweichung zum Mittelwert. Als Granulation des Bildes G wird der Mittelwert aus den 9 Messfeldern angegeben:

$$G_{Feld} = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (3.12)$$

$$G = \frac{1}{9} \sum_{j=1}^9 G_{Feld,j} \quad (3.13)$$

Specklekontrast

Im Gegensatz zur Granulation handelt es sich bei Speckel nicht um ein fest stehendes Muster, sondern um eine durch Interferenz von Laserlicht entstehende, feinkörnige Helligkeitsverteilung, die empfindlich auf Störungen des Systems reagiert. Bei Aufnahme eines Kamerabildes aus fester Position führen Speckle zu einem der Granulation ähnlichen Bildeindruck. Häufig wird zwischen objektiven und subjektiven Speckel unterschieden, wobei objektive Speckle ohne ein abbildendes System gemessen werden, während bei der Messung subjektiver Speckle beispielsweise eine Kameraoptik verwendet wird. Die Ausbildung von Speckeln findet in speziellen, in dieser Arbeit untersuchten Projektionssystemen statt. Da die Detektion unter anderem von der verwendeten Kamera und deren Einstellungen abhängt, wird ein einheitliches Verfahren zur Quantifizierung verwendet.

Der Specklekontrast wird anders als die Granulation auf einem Schirm bestimmt, auf den das zu untersuchende Bild projiziert wird. Es wird dazu eine Kamera des Typs Marlin F-201b mit einem Ciconon 1,4/12 Objektiv der Firma Schneider Kreuznach in 30 cm Abstand zu einem Papierschirm platziert, der als Projektionsfläche dient. Die Blendeneinstellung beträgt 11 und es wird ein vollflächiges Bild auf dem Schirm aufgenommen. Die Bestimmung des Kontrastwertes erfolgt analog zur Granulation in neun Messfeldern über Gleichung 3.13.

In der Literatur finden sich unterschiedliche Werte für akzeptable Niveaus des Specklekontrasts (2 % [23], 4 % [49], 5 % [50], 8 % [51]). Mit der hier beschriebenen Messmethode wurde in [52] ein akzeptables Niveau von 7 – 8 % festgelegt.

KAPITEL 4

PROJEKTIONSBASIERTE HUDS

Als eine Hauptgruppe autostereoskopischer HUD-Konzepte stehen in diesem Kapitel Systeme im Fokus, die auf Projektionen bzw. auf typischen bei Projektionssystemen verwendeten Bauteilen beruhen. Um verschiedenste Bildgeberkonzepte prototypisch evaluieren zu können, wird im ersten Abschnitt eine entwickelte, vielseitig einsetzbare Testoptik vorgestellt, die auch bei in Kap. 5 untersuchten, LCD-basierten Konzepten Anwendung findet. Nachfolgend werden verschiedene, auf LEDs und Laserlicht basierende Konzepte untersucht, um ihr Potential für den Einsatz im autostereoskopischen HUD zu evaluieren.

4.1 VIELSEITIG EINSETZBARE TESTOPTIK

Um verschiedene Bildgeberkonzepte experimentell untersuchen zu können, wurde die in Abb. 4.1 dargestellte Testoptik designt und realisiert, mit der sowohl Projektionslösungen, als auch LCD-basierte Lösungen realisiert werden können. Das optische Design wurde im Rahmen dieser Arbeit als Teil einer Veröffentlichung vorgestellt [53]. Die Optik erfüllt unter anderem folgende Designanforderungen:

- Verwendung eines einzelnen Freiformspiegels.
- Verwendung eines planen Strahlteilers als Frontscheibenersatz.
- Horizontaler Verlauf der Sehachse des Nutzers zum Combiner.

- Horizontaler Verlauf der optischen Achse zwischen dem Display der Bildgebereinheit und der Freiformspiegelfläche (parallel zur Sehachse).
- Erhöhter Abstand zwischen Display und Spiegelfläche als Vorhalt für optische Elemente.
- Divergente Hauptabstrahlrichtungen am Display in x- und y-Richtung.
- Symmetrischer Aufbau der Optik für linke und rechte Eyebow.
- Senkrecht stehendes Display.

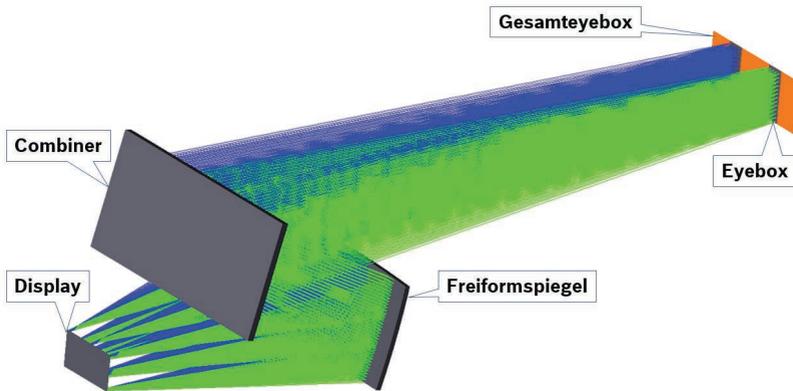


Abbildung 4.1: Darstellung des Designs einer vielseitig einsetzbaren Testoptik zur Untersuchung verschiedener Bildgeberkonzepte. Im dargestellten Fall werden zwei LCD-Module mittels eines Strahlteilers virtuell überlagert und über die Freiformfläche und den Combiner abgebildet.

Durch die Verwendung eines einzelnen Freiformspiegels erfordert das System eine geringe Justagegenauigkeit beim Aufbau. Da die plane Scheibe nur als Umlenker fungiert, wird eine Flexibilität in der Positionierung geschaffen. Eine Entspiegelungsschicht an der

Außenseite in Verbindung zur verspiegelten Innenseite führen zu einem hohen Doppelbildkontrast.

Die Geometrie des Systems bietet optimale Voraussetzungen zur einfachen Anpassung von Bildgebereinheiten. So führt der horizontale Verlauf der Strahlachsen mit senkrecht stehendem Display in der Regel zur Positionierung von Bildgeberelementen in einheitlicher Höhe, was den Aufbau auf einer optischen Bank erleichtert. Die divergente Abstrahlung des Displays erleichtert die Strahlformung insbesondere bei Einsatz von Projektionsflächen in Verbindung mit Projektoren. Durch die Symmetrie des Systems wird der Aufbau mit im Handel erhältlichen Optiken erleichtert. Dabei bietet der Vorhalt zwischen dem Display und dem Spiegel genug Raum zur Integration zusätzlicher optischer Elemente, wie beispielsweise einem Strahlteiler zur Überlagerung eines zweiten Displays (vgl. Kap. 5.2).

Im Designprozess wurden die in Kap. 2 vorgestellten Methoden und insbesondere die vorgestellte Optimierungsfunktion verwendet. Die Kenngrößen der auf diese Weise entwickelten Testoptik zusammen mit simulativ ermittelten Leistungsdaten finden sich in Tab. 4.1.

Die Ermittlung der Werte für die VSD, Spotgröße, Auflösung und Astigmatismus wurden mit dem in Kap. 2.1.1 vorgestellten Tool von *Bosch Car Multimedia* ermittelt [31].

Für die Ermittlung des Bauraumes wurde in einem CAD-Programm um das importierte optische Design ein grober Volumenkörper gelegt und händisch mittels Schnittebenen zur Anpassung an das Design verkleinert. Das Volumen des resultierenden Körpers ist eine Annäherung an den notwendigen Bauraum bei Realisierung des Systems mit mechanischem Gehäuse.

Parameter	Wert	Beschreibung
Combiner	plan	50/50-Strahlteiler, außen entspiegelt
AS	1	Anzahl Freiformspiegelelemente
VSD	3,2 m	Virtuelle Leinwanddistanz
σ_{VSD}	0,19 m	Standardabweichung Leinwanddistanz
FOV	$10^\circ \times 4^\circ$	Field of View (Blickfeld) in VSD
EB	140 mm \times 60 mm	Gesamteyeboxgröße
Spot	43 μ m	Durchschnittliche Spotgröße
Res	240 px/ $^\circ$	Übertragene Auflösung
AST	0,62 m	Durchschnittlicher Astigmatismus
Vol	6,41	Benötigter Bauraum ohne PGU

Tabelle 4.1: Parameterliste des Optikdesigns aus Abb. 4.1.

4.2 LED-PROJEKTION AUF MLA-FLÄCHE

Systemdesign

Eine Möglichkeit der Realisierung eines autostereoskopischen HUDs besteht in der Abbildung einer Projektionsfläche als Display der Bildgebereinheit (vgl. Kap. 3.1). Ein solches System wurde auf Basis eines kommerziell erhältlichen Projektors des Typs *ML-550* der Firma *Optoma* realisiert. Der Projektor basiert auf DLP-Technologie.

Zur Formung von schmalen Eyeboxen werden Projektionsflächen benötigt, die das Licht nur in schmale Raumwinkel streuen. Solche Projektionsflächen können auf Basis von refraktiven und diffraktiven Strukturen realisiert werden, wie sie beispielsweise von der Firma *Luminit* vertrieben werden. Je schmaler der benötigte Raumwinkel wird, desto eher tritt durch solche Streuflächen eine Granulation im Bild auf [6].

Auf Mikrolinsen basierende Systeme bieten gegenüber in der Regel gaussförmig abstrahlenden Streuflächen Vorteile bei der

Abstrahlformung [54, 55]. In dem hier realisierten Konzept wird daher auf ein Mikrolinsenarray als Projektionsfläche zurückgegriffen. Bei kommerziell erhältlichen Linsenarrays werden die Mikrolinsen in der Regel nicht direkt auf den Projektor angepasst. Vielmehr werden einige Mikrolinsen von einem abgebildeten Pixel des DLP-Chips gleichzeitig beleuchtet, was aufgrund von Kantenreffekten zwischen den Mikrolinsen zu beugungsbasierten Farbeffekten und einer Granulation im Bild führen kann.

Zur besseren Anpassung wurden für das Konzept eigens Mikrolinsenarrays designt, die extern am *Fraunhofer Institut IOF* nach Spezifikation hergestellt wurden. Um die Brechkraft in horizontale und vertikale Richtung separat einstellen zu können und Zwischenräume zwischen angrenzenden Mikrolinsen zu vermeiden, wurden zwei aufeinander folgende Zylinderlinsenarrays mit konvexen Linsen verwendet. Die Positionierung der Arrays wurde simulativ derart bestimmt, dass die Foki beider Stufen zusammenfallen.

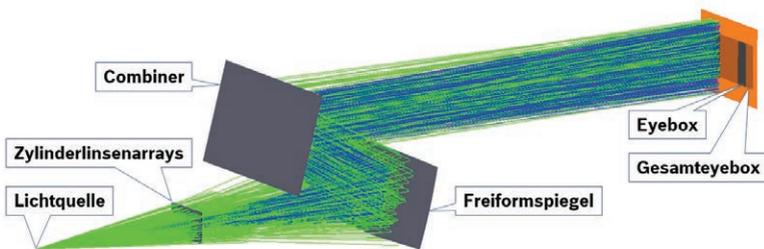


Abbildung 4.2: Simulation zur Auslegung der Zylinderlinsenarrays als Projektionsfläche eines asHUD-Konzepts auf Basis eines LED-Projektors.

Abb. 4.2 zeigt die Simulation des Konzepts zur Auslegung der Mikrolinsenarrays. Ohne Projektionsfläche betrachtet bildet das Objektiv

des Projektors ein reelles Bild in den Raum ab. Durch den im Vergleich zum Objektivdurchmesser großen Bildabstand ist der Winkel zwischen den äußeren Strahlen der Bildpunkte gering und führt zu einem vernachlässigbaren Anteil der Aufweitung der Bildpunkte durch die Fokussierung. Der Projektor wird in der Simulation daher vereinfacht als Punktlichtquelle angenommen, deren Licht durch die Zylinderlinsen derart aufgefächert wird, dass es über die Eyebox verteilt wird.

Das Licht trifft nahezu kollimiert auf die Zylinderlinsen und wird durch die konvexe Ausführung der Linsen fokussiert. Die Ebene, in der horizontale und vertikale Linsenarrays das Licht fokussieren, stellt die Displayebene des Systems dar. Der Linsenradius der horizontal verlaufenden Zylinderlinsen bestimmt die Höhe der Eyeboxen. Die Auslegung führt bewusst zu einem Überstrahlen über die Gesamteyebbox hinaus, um innerhalb der Eyebox bis in den Randbereich homogene Bilder zu erhalten (vgl. Kap. 2.3.3).

Die Pixel des im ML-550 Projektor verbauten 0,45" großen DLP-Chips sind in der sog. Diamantstruktur angeordnet, bei der die Diagonalen der einzelnen, quadratischen Spiegel des Chips waagrecht, bzw. senkrecht stehen. Nach der Vergrößerung durch das Projektionsobjektiv ergeben sich daher ebenfalls um 45° gedrehte Quadrate als Pixel auf der Projektionsfläche.

Abb. 4.3 veranschaulicht die Begebenheiten an der Projektionsfläche. Der Pitch (Abstand) der Zylinderlinsen stimmt dabei mit dem Pitch zwischen den abgebildeten Spiegeln über ihre Diagonale überein. Dadurch lassen sich die Linsenarrays derart ausrichten, dass jeder zweite Spiegel in die quadratische Schnittfläche zweier Zylinderlinsen fällt. Die Hälfte der abgebildeten Spiegel treffen auf die Kanten zwischen den Linsenarrays und können unter Auflösungsverlust

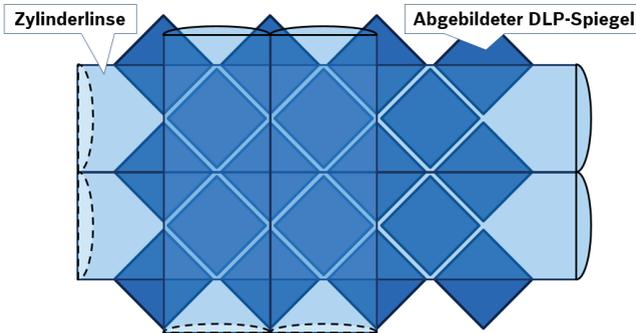


Abbildung 4.3: Darstellung des Funktionsprinzips der Abbildung eines DLP-Chips auf eine zweistufige, als Zylinderlinsenarrays realisierte Projektionsfläche.

deaktiviert werden, um Kanteneffekte zu vermeiden. In Tab. 4.2 ist eine Übersicht über die Parameter des Systems und der designten Zylinderlinsenarrays gegeben. Der benötigte Pitch der Zylinderlinsen berechnet sich dabei als das Produkt des Pitches auf dem DLP-Chip mit der Vergrößerung des verwendeten Objektivs.

Jeder Displaypunkt einer Bildgebereinheit im asHUD strahlt in einen schmalen Lichtkegel mit definierter Hauptabstrahlrichtung ab, um eine dezentrierte Eyebox zu erzeugen. Diese Richtung ist durch das Design der Abbildungsoptik vorgegeben und beträgt bei der Testoptik aus Abb. 4.1 $14,5^\circ$ bzw. $5,5^\circ$ an den Rändern des Displays in der mittleren Displayzeile. Da der Zentralstrahl zum Spiegel in dieser Optik horizontal verläuft, spreizen sich diese Winkel in der horizontalen Ebene ab. Um diese Abstrahlbedingungen zu erfüllen und gleichzeitig ein korrekt dimensioniertes Bild in kurzer Projektionsdistanz abzubilden, wurde die Entwicklung eines speziellen Objektivdesigns extern in Auftrag gegeben.

Parameter	Wert	Beschreibung
d_1, d_2	0,9 mm	Substratdicken Zylinderlinsenarrays
Material	Hybrid Polymer	Material der Linsenarrays
n_1, n_2	1,52	Brechzahl Linsenarrays bei 589 nm
R_1	601 μm	Linsenradius vertikaler Linsen
R_2	233 μm	Linsenradius horizontaler Linsen
p_1, p_2	73 μm	Pitch der Zylinderlinsenarrays
P_{DLP}	10,8 μm	Diagonaler Pitch auf dem DLP-Chip
V_{Obj}	6,77	Objektivvergrößerung
d_{Bild}	180 mm	Bildabstand Objektiv zu Schirm
B_{Bild}	63 mm	Bildbreite

Tabelle 4.2: Parameter des HUD-Systems mit als Projektionsfläche für einen LED-Beamer verwendeten Zylinderlinsenarrays. Als abbildende Optik wurde die Testoptik aus Abb. 4.1 eingesetzt.

Mit dem daraus entstandenen Objektiv mit einer Vergrößerung von 6,77 wurde das originale Objektiv des Beamers ersetzt. Um die Abstrahlbedingungen am Display zu erreichen muss der Projektor off-axes hinter den Zylinderlinsenarrays verschoben werden. Durch die symmetrische Abbildungsoptik wird die zweite Eyebox durch einen weiteren, symmetrisch in die entgegengesetzte Richtung verschobenen Projektor realisiert. Aufgrund mechanischer Kollision der beiden Projektoren insgesamt und Kollisionen der entwickelten Objektive mit den Platinen des einzelnen Projektors wurde ein Umbau der Projektoren im Rahmen eines weiteren, externen Auftrags durchgeführt.

Messtechnische Charakterisierung

Da sowohl die abbildende Optik, als auch die Bildgebereinheit selbst symmetrisch aufgebaut sind, kann auf die zweite Eyebox aus den Messwerten der ersten rückgeschlossen werden. Die Charakterisierung des Laborprototypen basiert daher auf der Vermessung einer einzelnen Eyebox.

In Abb. 4.4 ist die Messkurve des Eyeboxverlaufs dargestellt (vgl. Kap. 3.2 und Tab. 4.3). Durch die Verwendung der Zylinderlinsenarrays als Projektionsfläche zeigt die Form der Eyebox einen näherungsweise gaußförmigen Verlauf, wie er auch bei der Verwendung von Streuflächen mit schmalen Streuwinkel beobachtet werden kann. Die Eyebox läuft zum Ort der zweiten Eyebox hin sehr stark aus, wodurch sich ein sehr geringes Übersprechen des Teilbildes ergibt.

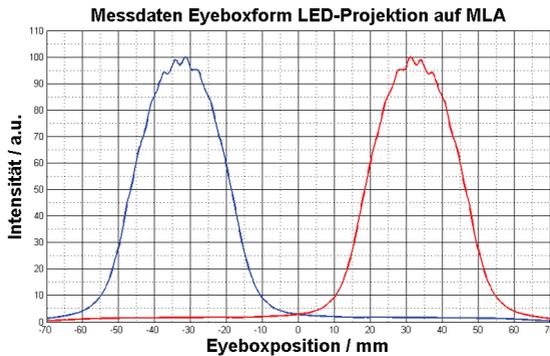


Abbildung 4.4: Messkurve der Eyeboxform für das Bildgeberkonzept mit MLA-Projektion. Die Breite der Eyebox beträgt jeweils 29 mm (FWHM).

Ein Leuchtdichtebild einer vollflächig weißen Anzeige ist in Abb. 4.5 links dargestellt. Es sind dabei alle Pixel der DLP-Matrix aktiv.

Die Skala der Aufnahme ist entgegen der Wahrnehmung des Auges linear aufgetragen, um den auch mit dem Auge noch leicht wahrnehmbaren Effekt der Strukturierung durch die Zylinderlinsen besser erkennen zu lassen.

Das System zeigt in dieser Konfiguration neben der Gitterstruktur auch geringe Farbeffekte. Diese negativen Effekte lassen sich durch eine Drehung der Linsenarrays kompensieren. So zeigt Abb. 4.5 in der rechten Aufnahme ein Leuchtdichtebild bei um 20° gedrehten Linsenarrays. Durch die gedrehten Aperturen der Arrays folgt ein Beschnitt des Bildes. Es ist erkennbar, dass sich das Bild deutlich homogenisiert.

Aus den experimentellen Untersuchungen ergibt sich die Empfehlung von um 45° gedrehten Zylinderlinsenarrays als Projektionsflächen für dieses Konzept. Durch die Anpassung des Linsenrasters auf die Spiegelorientierung werden Pixel an den Kanten zwischen den Mikrolinsen vermieden und müssen nicht unter Auflösungsverlust deaktiviert werden.

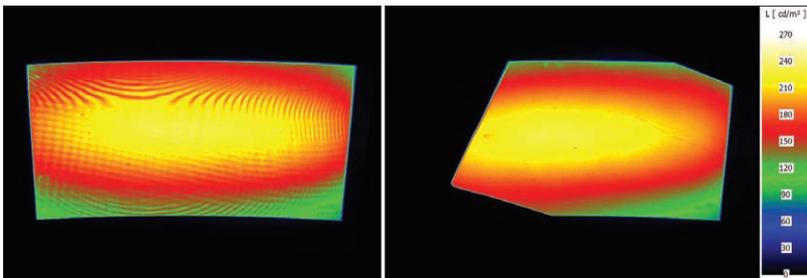


Abbildung 4.5: Links: Leuchtdichtebild des virtuellen Bildes bei weißer Anzeige. Rechts: Leuchtdichtebild bei Drehung der Zylinderlinsenarrays um 20° . Die Skalierung ist linear. Der Projektor wurde jeweils mit einem Graufilter der optischen Dichte $D = 4$ versehen, um die Messkamera bei niedrigster Integrationszeit nicht bereits überzubelichten.

Eine Zusammenfassung der messtechnisch ermittelten Kenngrößen des Systems findet sich in Tab. 4.3. Das Konzept überzeugt mit positiven Messergebnissen. Vor allem die hohe Helligkeit und die hohen Kontrastwerte sind dabei hervorzuheben. Eine Nachführung der Eyebowen kann in diesem Konzept durch eine Drehung der gesamten Bildgebereinheit um eine senkrechte Achse durch die Mitte der Displayebene bewerkstelligt werden. Die Abbildungsoptik zeigt sich dabei simulativ und experimentell tolerabel gegenüber der Drehung der Displayebene im benötigten Bereich von einigen wenigen Grad.

Konzept LED-Projektion auf MLA-Fläche	
Übersprechen	0,11 %
EB-Breite (FWHM)	29 mm
SW-Kontrast	1008 : 1
4 % Kontrast innen	246 : 1
4 % Kontrast außen	911 : 1
Leuchtdichte	$2,1 * 10^6 \text{ cd/m}^2$
Homogenität	1,5

Tabelle 4.3: Übersicht über einige Messwerte des asHUD-Konzepts auf Basis eines LED-Projektors in Kombination mit als Zylinderlinsenarrays realisierter Projektionsfläche.

Nachteilig ist die bei dieser Form der Nachführung zu bewegend große Masse der Bildgebereinheit. Für die Realisierung sind außerdem zwei Projektoren mit je einem DLP-Chip notwendig, die zwar automotivespezifisch verfügbar sind, aber zu hohen Kosten führen. Eine Problemstellung bei der Umsetzung des Konzepts im Fahrzeug ist die Vermeidung blendender Sonnenlichtreflektionen, da Reflektionen an der Projektionsfläche aufgrund der Krümmung der Linsen nicht durch eine Schrägstellung umgelenkt werden

können. Durch die Krümmung treten an bestimmten Auftreffpunkten auf den Mikrolinsen weiterhin Reflektionen in unerwünschte Richtungen auf. Ein möglicher Ansatz, diesem Effekt entgegenzuwirken, ist der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte und in Kap. 5.5.3 vorgestellte Ansatz.

4.3 LASERSCANNER AUF MLA-FLÄCHE

Eine alternative zu DLP-basierten Projektoren ist der im folgenden untersuchte Einsatz von scannenden Laserprojektoren, bei denen drei Laserstrahlen der Grundfarben über einen Mikrospiegel abgelenkt und auf einer Projektionsfläche gescannt werden, die als Mikrolinsenarray ausgelegt ist. Teile der in diesem Abschnitt vorgestellten Untersuchungen wurden im Rahmen dieser Arbeit veröffentlicht [53]. Die Mikrolinsen weiten den Laserstrahl auf, um ihn über die Eyebox aufzuweiten. Der Betrachter schaut direkt in den aufgeweiteten Laserstrahl. Da in diesem System keine zufällige Streuung des Laserlichts stattfindet und die Phasenfront des Lichts beim Aufweiten an den Mikrolinsen intakt bleibt, kann die Bildung von Specklen vermieden werden. Solche Konzepte wurden von der Firma *MicroVision* bereits für nicht stereoskopische Systeme vorgestellt [56, 57]. Die Projektionsfläche kann prinzipiell auch holographisch realisiert werden. Ein entsprechendes System wird in Kap. 4.4 untersucht.

Durch die Verwendung von schmalbandigem Laserlicht mit sehr kleinen Lichtquellen lassen sich effiziente Systeme mit hoher Helligkeit auslegen. Die Abdeckung eines großen Farbraums durch die Farbmischung aus Laserwellenlängen führt zu stark gesättigten Farben, welche aufgrund des Helmholtz-Kohlrausch-Effekts zusätzlich als heller gegenüber ungesättigten Farben wahrgenommen werden [58].

Durch das polarisierte Licht lässt sich das System anpassen, um eine maximale Reflektion an der Frontscheibe zu erhalten. Reflektiert die Frontscheibe beispielsweise nahe dem Brewsterwinkel, kann eine reine s-Polarisation gewählt werden. Ein weiterer Vorteil liegt in hohen, potentiell erreichbaren Kontrasten, da die Laserquelle moduliert und beim Scannen über inaktive Pixel des Displays komplett ausgeschaltet werden kann.

Für den Aufbau des Konzepts standen zwei Flying Spot Projektoren der Firma *MicroVision* zur Verfügung, die bereits auf HUD-Anwendungen angepasst wurden. Die Projektoren wurden außerhalb dieser Arbeit im Rahmen des Bosch Projekts „Autostereoskopisches HUD“ charakterisiert. Dabei ergaben sich Öffnungswinkel der Projektion von 45° in der Horizontalen bzw. 17° in der Vertikalen und es wurde der in Abb. 4.6 dargestellte Verlauf der Spotgrößen in Abhängigkeit von der Projektionsdistanz gemessen (Messung durchgeführt in [59]).

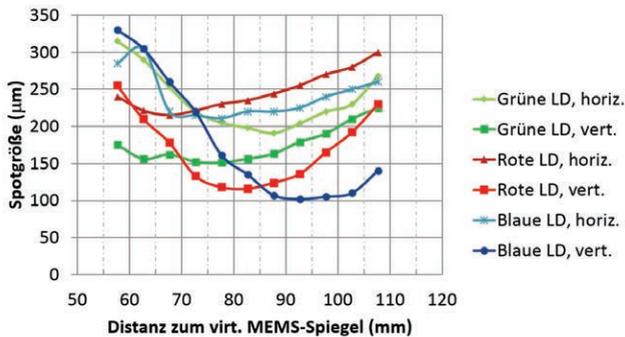


Abbildung 4.6: Vermessung der Spotgröße eines Laserprojektors der Firma *MicroVision* mit Hilfe eines Profilometers (Messung durchgeführt in [59]).

Die Kurven veranschaulichen, dass die Projektoren für eine Leinwanddistanz von etwa 70 mm bis 90 mm ausgelegt sind und dort Spotgrößen von unter $250 \mu\text{m}$ erreichen. Die Größe des Bildes, sowie die Winkel zur Projektionsfläche sind dabei festgelegt.

Um für den autostereoskopischen Aufbau zwei Projektoren nebeneinander und jeweils leicht off-axes platzieren zu können, mussten die Projektoren senkrecht gestellt werden, um eine mechanische Kollision zu verhindern. Der horizontale und vertikale Öffnungswinkel wird dadurch getauscht und es stehen horizontal noch 17° zur Verfügung.

Um das System mit der in Kap. 4.1 beschriebenen Abbildungsoptik realisieren zu können, ist eine Anpassung der Abstrahlcharakteristik und der Bildgröße erforderlich. Abb. 4.7 zeigt Simulationen der dahingehend untersuchten Varianten. Die Strahlen starten dabei jeweils aus einem Punkt, der der Position des Mikrospiegels (MEMS-Element) im Projektor entspricht. Die Abbildungen zeigen die Strahlen eines einfachen Ray Tracings, wohingegen die eigentliche Auswertung auf der Berechnung von Gauß-Strahlen durch das optische System beruht, durch die insbesondere kollimierte Laserstrahlen realistischer beschrieben werden können (*Physical Optics Propagation* im Simulationsprogramm *Zemax Optic Studio*). Der simulierte Beam Waist von $150 \mu\text{m}$ horizontal bzw. $215 \mu\text{m}$ vertikal bei einer Wellenlänge von 550 nm lag dabei 77,4 mm vor dem MEMS-Element. Die Auslegung des Systems erfolgt angepasst an den grünen Laser des Projektors (vgl. Abb. 4.6).

In der Simulation des ersten Ansatzes wird dabei auf zusätzliche Optiken verzichtet und die Abstrahlwinkel werden durch Positionierung des Projektors eingestellt. Durch den vergrößerten Abstand können nicht sowohl horizontaler, als auch vertikaler Abstrahlwinkel der Projektionsfläche eingestellt werden. Dadurch laufen die durch

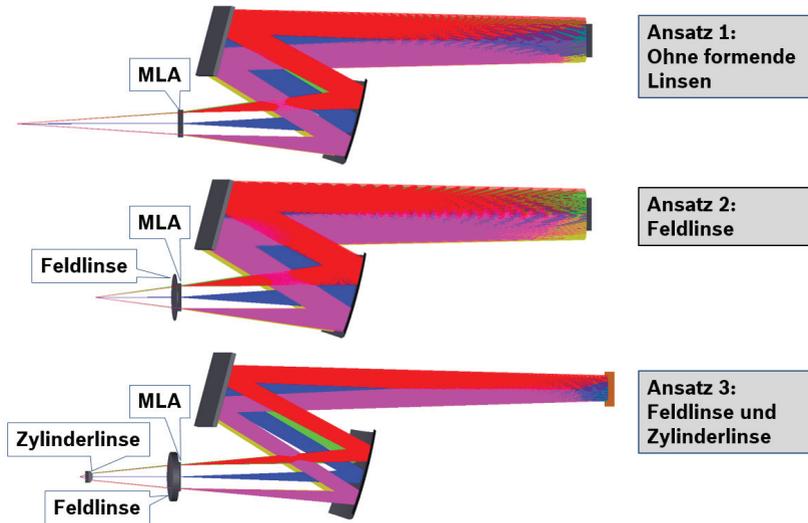


Abbildung 4.7: Vergleich verschiedener Varianten eines Fly-Spot Laserprojektionsystems mit einem Mikrolinsenarray als Projektionsfläche.

die einzelnen Displaypunkte generierten Eyeboxen in der Vertikalen auseinander. Die Aufweitung der Mikrolinsen muss entsprechend hoch gewählt werden, um sicherzustellen, dass sich innerhalb der nutzbaren Eyebox die von den einzelnen Bildpunkten erzeugten Eyeboxen überlappen. Die simulativ entwickelten Ansätze realisieren jeweils eine nutzbare Eyebox von mindestens $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$.

Im zweiten Ansatz wird eine Feldlinse vor der MLA-Fläche eingesetzt, um die Abstrahlbedingung bei geringerer Bauraumtiefe zu erreichen. In laserbasierten Systemen kann eine solche Feldlinse holographisch realisiert werden. Ein entsprechender Ansatz wurde ausgearbeitet und als Patententwurf beim Deutschen Patentamt eingereicht [36]. Im dritten Ansatz wird eine zusätzliche, zylindrische Linse

eingesetzt, um den vertikalen Öffnungswinkel des Projektors an die Abbildungsoptik anzupassen.

Parameter	Ansatz 1	Ansatz 2	Ansatz 3
Spot in x	282 μm - 291 μm	223 μm - 233 μm	246 μm - 257 μm
Spot in y	301 μm - 307 μm	173 μm - 178 μm	650 μm - 858 μm
Raumw. hor.	13°	25°	25°
Raumw. vert.	8°	15°	40°
Pixel $x \times y$	217 \times 557	720 \times 432	720 \times 1129
effektive Pixel	217 \times 130	193 \times 225	178 \times 47
Display $x \times y$	68 mm \times 40 mm	45 mm \times 40 mm	46 mm \times 40 mm
Abstand	302 mm	155 mm	172 mm

Tabelle 4.4: Parameter der untersuchten Ansätze mit Flying Spot Projektion auf eine MLA-Fläche aus Abb. 4.7. Angegeben sind die Spotgrößen auf der Projektionsfläche, der von der Optik genutzte Raumwinkel der Projektorabstrahlung, die in diesen Raumwinkel abgestrahlten Pixel, die effektiv wahrnehmbaren Pixel, die bespielte Displayfläche auf der Projektionsfläche und der Abstand zwischen dem Projektor und der Projektionsfläche.

Tab. 4.4 gibt eine Übersicht der entwickelten Designs für die drei Ansätze. Die angegebenen Spotgrößen geben jeweils den Bereich an, in dem verschiedene auf dem Display verteilte Punkte variieren. Die von der Projektorabstrahlung genutzten Raumwinkel spiegeln sich in den aufgefangenen Pixeln der vom senkrecht aufgestellten Projektor gelieferten 720×1280 Bildpunkte wider. Durch die teilweise hohen Spotgrößen überlappen die aufgefangenen Pixel auf der Projektionsfläche. Die wahrgenommene, effektive Pixelanzahl ist daher limitiert durch den Quotienten der Displaybreite bzw. der Displayhöhe mit der maximal auftretenden Spotgröße.

Im ersten Ansatz ist eine enorme Bautiefe erforderlich und es werden nur wenige Bildpunkte aufgefangen, da der Projektor die Projektionsfläche bei weitem überstrahlt.

Im zweiten Ansatz rückt der Projektor durch die Feldlinse näher zum Display, wodurch dieses näher an der Strahltaile liegt und die Spotgröße reduziert wird. Die Projektionsfläche wird in der horizontalen nicht mehr voll ausgeleuchtet, was in einer schmaleren, genutzten Displayfläche resultiert.

Der dritte Ansatz ermöglicht durch die zusätzliche Zylinderlinse eine präzise Eyeboxformung, allerdings verschlechtert die zusätzliche Optik das Strahlprofil, wodurch die Spotgrößen insbesondere zum Bildrand hin hohe Werte annehmen. Trotz des größeren, genutzten Raumwinkels in der Vertikalen ist die wahrgenommene Pixelanzahl durch die Spotgröße in der Vertikalen stark reduziert.

Für die Konzeptbewertung wird der zweite Ansatz durch die vergleichsweise geringen Spotgrößen und den geringen Bauraum als der geeignetste bewertet. Daher wurde für einen prototypischen Aufbau das in Abb. 4.8 gezeigte Mikrolinsenarray designt.

Aus der simulativ bestimmten, genutzten Displayfläche, dem genutzten Raumwinkel und der nativen Auflösung des Laserprojektors folgt in diesem Ansatz ein Abstand zwischen den einzelnen Bildpunkten von $63 \mu\text{m}$ in der Horizontalen und $92,6 \mu\text{m}$ in der Vertikalen der Projektionsfläche. Der Pitch zwischen den Mikrolinsen (P_x, P_y) wurde jeweils als das 3-fache dieses Abstandes gewählt, um eine Periodizität über die Projektionsfläche bei der Justage des Arrays zu gewährleisten und gleichzeitig Raum für ausreichend große Linsen zu schaffen, die in der Größenordnung der Spots liegen.

Die Mikrolinsen liegen in x-Richtung dicht aneinander, um in dieser Richtung eine höhere Auflösung transportieren zu können, was stereoskopischen Systemen hinsichtlich der darzustellenden Disparität des

Bildes entgegen kommt [28, 60]. Zwischen den Mikrolinsen befindet sich eine geschwärzte Blendenstruktur („Black Matrix Polymer“), wodurch ein Durchstrahlen des Arrays mit kollimiertem Laser zwischen den Linsen vermieden wird.

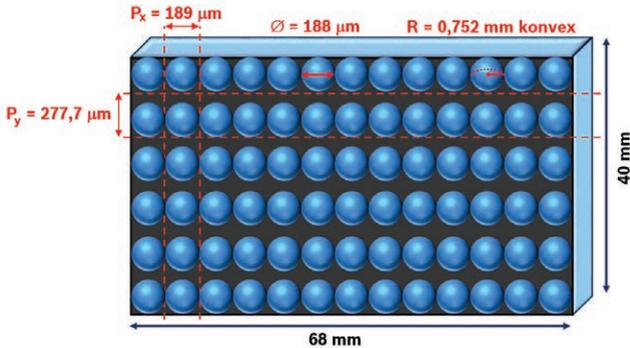


Abbildung 4.8: Parameter der ausgelegten und extern in Auftrag gegebenen Mikrolinsen als Projektionsfläche für ein Flying Spot System. Zwischen den Linsen befindet sich eine Blendenstruktur.

Tatsächlich bewegt sich der gescannte Laserstrahl nicht in einer gleichförmig Zeilen beschreibenden Weise über die Projektionsfläche. Die horizontale Ablenkung findet über eine resonante Schwingung des reflektierenden Mikrospiegels bei hoher Frequenz statt (vgl. [61, 62]). Die Geschwindigkeit des Laserstrahls unterscheidet sich dadurch an verschiedenen Stellen, was durch eine angepasste Pulsdauer beim Schreiben der einzelnen Pixel berücksichtigt werden muss. Die schnellere Bewegung im Zentrum führt im Vergleich zum Randbereich zu einer vergrößerten, effektiven Breite des abgebildeten Spots. Um die effektive Pixelgröße möglichst gering zu halten, kann eine Top-Hat-Formung des Laserstrahls vorgenommen werden.

Die vertikale, langsamere Achse wird gleichmäßig durchfahren und springt von der letzten in die erste Zeile zurück. Durch diese überlagerte Bewegung liegen die Zeilen nicht waagrecht auf der Projektionsfläche. Prinzipiell kann die vom Laserstrahl auf der Projektionsfläche beschriebene Trajektorie durch einen zusätzlichen, kompensierenden Mikrospiegel verformt werden, um in weiten Bereichen gleichmäßige Zeilen zu beschreiben und die Bewegung an ein Mikrolinsenraster anzupassen.

Die horizontale und vertikale Bewegung können alternativ über zwei einachsige Mikrospiegel realisiert werden. Werden beide Achsen in Resonanz angeregt, so beschreiben die Trajektorien Lissajouskurven, die je nach Teilungsverhältnis der beiden Schwingungen feststehend sein können [63].

Die Annahme der projizierten Pixel als ein gleichförmiges Punktraster für die Auslegung der Mikrolinsen ist im untersuchten System eine Näherung.

Um im Betrieb eines Laboraufbaus sicherzustellen, dass jede Mikrolinse nur von einem einzelnen Bildpunkt durchstrahlt wird, kann beispielsweise ein Testbild verwendet werden, bei dem nur jeder dritte Pixel aktiv ist. Da der Flying Spot Projektor die Bildpunkte zeitsynchron aufbaut, können diese zwar nicht interferieren, allerdings können so die Auftreffpunkte der Strahlen auf die Linsen exakter justiert werden.

Bei der Auslegung eines solchen scannenden Systems gibt es eine Vielzahl von zu beachtenden Faktoren, welche den Bildeindruck verschlechtern können. Einige davon sind:

- Abbildung der Blendenstruktur in das virtuelle Bild:
Da das Blendengitter auf der Projektionsfläche nahe der Displayebene des Systems liegt, wird dieses scharf in die Nähe des

virtuellen Bildes abgebildet. Durch die vergrößernde Abbildung der HUD-Optik können so Blendenstrukturen sichtbar werden.

- **Abbildung der Displaypixel als Punktgitter:**
Werden sehr kleine virtuelle Spots im Bild erzeugt, so können die Bildpunkte bei zu geringer Auflösung als lückenhaftes Punktmuster wahrgenommen werden.
- **Reelle Abbildung virtueller Lichtquellen:**
Ergeben sich durch die Strahlformung virtuelle Lichtquellen, die sich in Strahlrichtung betrachtet noch vor der Projektionsfläche befinden, können diese außerhalb der Brennweite der Abbildungsoptik liegen und werden dann reell in den Raum vor dem Fahrzeug abgebildet.
- **Beugungseffekte an der MLA-Struktur:**
Durch die Gitterstruktur zwischen kleinen Mikrolinsen können wahrnehmbare Beugungseffekte entstehen. Durch die Scannbewegung kann der Strahl dabei die Kanten treffen, trotz dass die Spotgröße bei richtiger Justage in einer Momentaufnahme in die Apertur der Mikrolinse passt.
- **Chromatische Effekte:**
Chromatische Effekte entstehen durch die unterschiedliche Aufweitung der drei Laserfarben und auch durch das abweichende Strahlprofil. Insbesondere bei schmalen Eyeboxen können die Farbeffekte sichtbar werden.
- **Unterschiedliche Strahlaufweitung über die Pixel des Displays:**
Da der Projektor in den untersuchten Ansätzen unter einem Öffnungswinkel auf die Mikrolinsenstruktur projiziert, werden äußere Linsen unter einem Winkel durchstrahlt, der die Strahlaufweitung beeinflusst.

Im autostereoskopischen Aufbau müssen die Strahlen nur über eine schmale Eyebox aufgeweitet werden, was eine geringere

Strahlaufweitung erfordert und damit geringere Linsenkrümmungen ermöglicht. Dies bietet einen Vorteil gegenüber nicht stereoskopischen Systemen, bei denen die Strahlen über die Gesamteyebox aufgeweitet werden müssen, was zur Notwendigkeit einer zweistufigen Strahlaufweitung mit einem weiteren Linsenarray führen kann. Um die Aperturen dieser Mikrolinsenstufen korrekt zu durchlaufen, kann in diesem Falle auch ein System mit vorheriger Kollimation der Lichtstrahlen im vom Projektor bespielten Raumwinkel eingesetzt werden, was die Komplexität weiter erhöht.

Ein prototypischer Aufbau des Konzepts mit Flying Spot Laserprojektor und den hier entwickelten Mikrolinsen wurde außerhalb dieser Arbeit im Bosch Projekt „*Autostereoskopisches HUD*“ durchgeführt [64], wobei trotz hier beschriebener Auslegung der Mikrolinsen ein System nach dem dritten Ansatz mit zusätzlicher Zylinderlinse aufgebaut wurde, um die Abstrahlrichtungen an der Displayfläche experimentell besser an die Abbildungsoptik anpassen zu können.

Anschließend wurde der Aufbau außerhalb dieser Arbeit messtechnisch charakterisiert. Dabei erreichte das Konzept eine übertragene Auflösung von 144×172 Bildpunkten [65]. Trotz hoher Leuchtdichte und niedrigem Übersprechen wurde das Konzept im Rahmen des Bosch Projekts daher zurückgestellt.

Aufgrund der kritischen Strahlformung im Zusammenhang mit der Bildgröße und den Abstrahlrichtungen an der Projektionsfläche wird an dieser Stelle empfohlen, die Projektor-interne Optik, wie auch die Optiken des Bildgebers und der Abbildungsoptik in einem gemeinsamen Designprozess zu simulieren und aufeinander anzupassen.

4.4 LASERSCANNER AUF HOE MIT STRAHLAUFWEITUNG

Der Einsatz von Laserlicht im Konzept aus Kap. 4.3 ermöglicht die Verwendung holographischer Elemente im optischen System, durch die die Systemeffizienz gesteigert und der notwendige Bauraum verringert werden kann. Daher erfolgt in diesem Abschnitt eine rein simulative Untersuchung des in Abb. 4.9 veranschaulichten Ansatzes, der eine holographische Projektionsfläche zur Strahlaufweitung eines Flying Spot Projektors, sowie eine in die Frontscheibe eingebettete, holographische Schicht mit der Funktion eines abbildenden Spiegels verwendet. Das entwickelte Konzept wurde in Form eines Patententwurfs beim Deutschen Patentamt eingereicht [33]. Entsprechende Hologramme mit Linsenfunktion sind in ausreichender Größe aus der Literatur bekannt [66].

Die Laserstrahlen werden an der Projektionsfläche aufgeweitet und nicht gestreut, wodurch die Phasenfront intakt bleibt. Dadurch wird die Entstehung von Speckleeffekten vermieden, wie sie bei ähnlichen Systemen mit Streuflächenfunktion auftreten [67].

Die Projektionsfläche zeichnet sich durch pixelweise eingeschriebene holographische Funktionen aus, welche ähnlich einem Mikrolinsenarray die Laserstrahlen des Projektors aufweiten, sodass jeder Pixel die Eyebox ausleuchtet, aus der das Beobachteraue in den Laserstrahl blickt.

Durch die Aufweitung der Strahlen ohne zufällige Streuung werden Speckleeffekte vermieden. Abb. 4.9 zeigt den Aufbau mit einem Transmissionshologramm als Projektionsfläche, wobei auch ein Reflektionshologramm einsetzbar ist. Der Winkel der Aufweitung ist hierbei nicht refraktiv limitiert und kann hohe Werte annehmen. Das Frontscheibenhologramm beinhaltet die optische Funktion eines

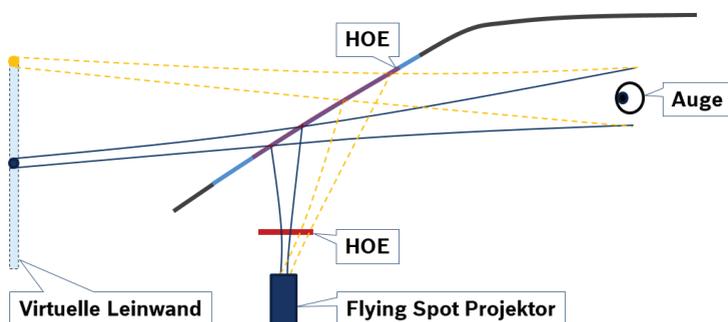


Abbildung 4.9: Prinzipielle Funktionsweise des hier vorgeschlagenen Systems. Es kommt dabei ein Flying Spot Laserprojektor zum Einsatz. Die Laserstrahlen des Projektors werden durch ein Hologramm aufgeweitet und treffen dann auf ein weiteres Hologramm, das in die Frontscheibe integriert ist. Das Frontscheibenhologramm lenkt den Laserstrahl zur Eyebox um. Der Beobachter sieht Bildpunkte aus der virtuell abgebildeten Strahltaile des Laserstrahls auf der virtuellen Leinwand.

sphärischen Spiegels und wird als einfacher Kugelwellenumlenker angenommen. Es bildet dabei den Ort des Mikrospiegels in das Zentrum der Eyebox ab. Die Projektionsfläche liegt somit innerhalb der Brennweite dieses holographischen Spiegels und wird ins virtuelle Bild abgebildet.

Die Hologramme wirken auf die drei Grundfarben des Projektors mit weitestgehend unabhängiger optischer Funktion [68]. Dadurch kann das optische System für jede Laserfarbe separat optimiert werden. Beispielsweise können dadurch auch die Pixelgrößen, die Auflösung oder die Positionierung der Pixel der verschiedenen Farben variieren. Auf die abbildende HUD-Optik in Form von Freiformspiegeln kann verzichtet werden, wodurch sich der notwendige Bauraum und die Kosten reduzieren. Eine grundlegende Herausforderung im Design

eines Flying Spot Projektors ist die Realisierung einer geringen Spotgröße an der Projektionsfläche unter Einhaltung eines maximalen Strahldurchmessers am Mikrospiegel, bedingt durch dessen Größe [69]. Durch den Wegfall der Abbildungsoptik erhöht sich der Bau- raum bei einer Vergrößerung der Projektionsfläche nur geringfügig, wodurch diese bewusst großzügiger dimensioniert werden kann, um größere Spotgrößen zu erlauben. Dadurch werden geringere Anforderungen an die Strahlqualität gestellt und die Strahltaile kann näher am Mikrospiegel positioniert werden, wodurch der Spiegel kleiner dimensioniert werden darf.

Das System profitiert außerdem von den im vorigen Konzept bereits erläuterten Vorteilen des Flying Spot Systems wie z.B. dem großen Farbraum, gesättigten Farben, hohen Kontrasten oder der Möglichkeit der Polarisationsanpassung. Die Polarisation kann beispielsweise derart angepasst werden, dass die lineare Polarisation am Beobach- terauge diagonal im Raum steht. Diese Orientierung verhindert ein Ausfiltern des Bildes durch polarisationsabhängige Sonnenbrillen, die benutzt werden, um blendende Sonnenreflektionen an horizontalen Flächen in der Fahrscene abzuschwächen.

Das Systemdesign wird derart ausgelegt, dass die Fresnellreflekti- on des auf die Frontscheibe einstrahlenden Lichtes nach außerhalb der Gesamteyebox abgelenkt wird. Die Umlenkung des Nutzlichtes erfolgt ausschließlich über die Beugung am Hologramm. Die Beu- gungseffizienz des Hologramms bestimmt den genutzten Anteil des Lichtes und liegt in der Regel weit über dem durch Fresnellreflektion genutzten Anteil, wodurch sich die Systemeffizienz erhöht. Durch die diffraktive Umlenkung wird das System außerdem robust gegenüber der Frontscheibenform.

Da die holographische Projektionsfläche einzelne, holographische Funktionen für die Pixel besitzt, kann jeder Pixel auch derart ausgelegt sein, dass eine virtuelle Lichtquelle entsteht, die sich außerhalb der Ebene der Projektionsfläche befindet. Die Ebene der virtuellen Lichtquellen stellt dann die Abbildungsebene für die holographische Vergrößerungsoptik in der Frontscheibe dar.

Die Simulation einer konkreten Auslegung des Systems findet sich in Abb. 4.10. Die Berechnungen des Systems basieren auf gaußförmigen Laserstrahlen, wohingegen die Abbildung des System durch einfaches Ray Tracing veranschaulicht.

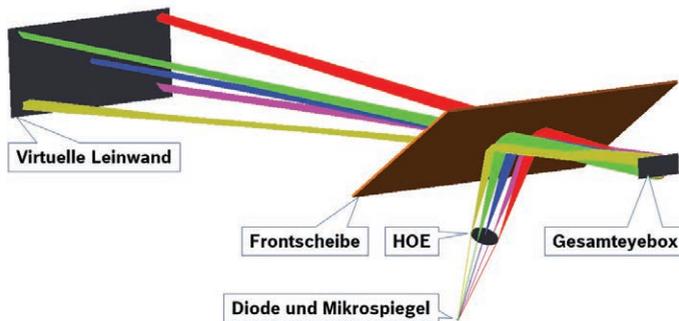


Abbildung 4.10: Simulation eines Laserprojektions-HUDs nach dem hier untersuchten Ansatz. Das System ist für die Erzeugung einer schalen Eyebbox ausgelegt und ist vereinfacht mit geometrischen Strahlen dargestellt. Eine zweite Eyebbox zur Realisierung eines autostereoskopischen Systems kann durch Integration eines weiteren Projektors oder durch entsprechende Substrukturen auf der Projektionsfläche erzeugt werden, bei denen die Pixel abwechselnd die linke oder rechte Eyebbox bedienen. Die erreichten Systemparameter sind Tab. 4.5 zu entnehmen.

In Tab. 4.5 finden sich einige Kenngrößen des simulierten Systems. Darin ist erkennbar, dass der Strahldurchmesser am Ort des Mikrospiegels unter einem Millimeter beträgt. Damit unterschreitet der zu scannende Laserstrahl die Dimension typischer Mikrospiegel. Der Abstand der Strahltaile der Laserstrahlen der fünf verschiedenen, simulierten Displaypunkte beträgt maximal 8 mm von der in 3 m entfernt befindlichen virtuellen Leinwand. Damit liegt die wahrgenommene Leinwanddistanz nahe an den angestrebten 3 m.

Parameter	Wert	Beschreibung
VID	3 m	Virtuelle Leinwanddistanz
FOV	$9^\circ \times 4^\circ$ (h \times v)	Field of View
EB	40 mm \times 40 mm (h \times v)	Eyeboxgröße
LD	1,5 μm \times 1,5 μm	Emitterfläche der Laserdiode
MS	1 mm \times 1 mm	Dimension Mikrospiegel
Spot MS	692 μm \times 979 μm (h \times v)	Spot am Mikrospiegel
Spot HOE	183 μm \times 183 μm (h \times v)	Spot am Zwischen-HOE

Tabelle 4.5: Parameter des HUD-Systems aus Abb. 4.10.

Ein Nachteil des Systems liegt im hohen technischen Aufwand der Anpassung des Strahlprofils im Komplettsystem. Entsprechende Flying Spot Projektoren werden idealer Weise gemeinsam mit dem System ausgelegt. Die Realisierung von pixelweise geschriebenen RGB-Hologrammen ist zwar prinzipiell möglich [68], stellt aber ebenfalls eine technische Herausforderung dar. Die Einbettung eines holographischen Elements in die Frontscheibe ähnelt der Einbettung von PVB-Folien (Polyvinylbutyral) zur Splitterbindung in modernen Frontscheiben. Durch Umgebungslicht kann es an der Frontscheibe allerdings zu designtechnisch umstrittenen Farbeffekten kommen. Außerdem stellen sich Herausforderungen in der Vermeidung

von Störlichteffekten durch Sonnenlicht, da dieses bei ungünstiger Winkelkonfiguration das Frontscheibenhologramm ungewollt rekonstruieren kann.

Speckle können bei geeigneter Aufnahme der Hologramme prinzipiell vermieden werden. Treten dennoch Speckle beispielsweise aufgrund geringer Streuung auf, so können diese mit teils hohem technischen Aufwand minimiert werden. Aus der Literatur bekannte Ansätze basieren beispielsweise auf einer Winkelaufweitung des Strahls [70], diffraktiven optischen Elementen [49], binären Phasendiffusoren [71, 72], oder eine Verbreiterung des Laserspektrums jeder Farbe auf einige Nanometer [73].

Bei Systemen mit kollimierten, auf der Projektionsfläche scannenden Laserstrahlen ist besonders auf die Augensicherheit zu achten. Beim Aufbau eines autostereoskopischen HUDs werden wiederum zwei Projektoren benötigt, die jeweils eine Eyebow bedienen. Es ist denkbar bei ausreichend scharfer Abgrenzung der Pixel auf der Projektionsfläche beispielsweise zeilenweise zwischen Bildpunkten für die beiden Augen umzuschalten. Ein solches System erfordert allerdings eine sehr hohe Justagegenauigkeit und reduziert die Auflösung pro Auge. Eine Nachführung kann durch Drehung der Projektoren und der Bildgebereinheit realisiert werden (Projektoren und Projektionsfläche) oder durch Drehung der Projektionsfläche im Falle einer Ausführung als Reflektionshologramm.

Anwendung der Simulationsmethodik in einem Datenbrillensystem

Ein dem untersuchten Konzept simulativ ähnliches Displaysystem ist eine Datenbrille, bei der ebenfalls ein gesannter Laserstrahl durch

ein Hologramm geformt und durch ein zweites, reflektiv arbeitendes Hologramm am Brillenglas umgelenkt und zum Auge geführt wird. Das Bild wird dabei durch den scannenden Laserstrahl direkt auf die Netzhaut des Auges geschrieben. Die Herausforderungen sind dabei, geeignete Spotgrößen auf der Netzhaut, dem Mikroskopspiegel und auf den Hologrammen zu erreichen, wobei gleichzeitig das Licht für verschiedene Pupillenpositionen angeboten werden muss. Die entwickelte Simulationsmethodik wurde daher im Rahmen dieser Arbeit für eine grundlegende optische Simulation eines Datenbrillensystems angewandt. Es wurde ein optisches Konzept für eine Datenbrille entwickelt und als Patententwurf beim Deutschen Patentamt eingereicht [34].

4.5 LASERPROJEKTION AUF HOE

Trotz der Vorteile der in den vorigen Kapiteln besprochenen, laserbasierten Konzepte bleibt die technisch herausfordernde Vermeidung der Entstehung von Speckleeffekten. Im Folgenden wird ein alternativer Ansatz simulativ und experimentell untersucht, bei dem ein laserbasierter DLP-Projektor als Bildgeber für ein holographisches HUD entwickelt wird. Das Konzept ermöglicht eine wesentliche Reduktion der auftretenden Speckle durch eine zeitliche Phasenmodulation innerhalb des Projektors. Es können dabei leistungsstarke Multimode Laserdioden augensicher eingesetzt werden. Der entwickelte Projektor eignet sich als universelle Laserprojektionseinheit für Anzeigesysteme, in denen zusätzliche Abbildungsoptiken oder Hologramme enthalten sein können.

Im zweiten Teil wird der Laserprojektor mit einem dafür aufgenommenen Hologramm und der Testoptik aus Kap. 4.1 kombiniert, um ein System zu realisieren, das eine einzelne Eyebox erzeugt. Die

entwickelten Konzepte wurden ausgearbeitet und als Patententwurf beim Deutschen Patentamt eingereicht [35].

4.5.1 DLP-LASERPROJEKTOR

Als Basis der Projektorentwicklung diente ein DLP-Beamer des Typs *ML-550* der Firma *Optoma*. Es handelt sich dabei um einen LED-basierten Projektor, dessen Hinterleuchtungseinheit entfernt und durch Laserdioden mit entsprechenden Optiken ersetzt wurde. Dabei wurde auf im Handel erhältliche Optiken zurückgegriffen, die durch die in Abb. 4.11 gezeigte Simulation bestimmt und positioniert wurden. Der mechanische Aufbau erfolgte nach einem angefertigten CAD-Modell, das im Forschungsmusterbau umgesetzt wurde (vgl. Anhang Kap. A.2.2, S. 230).

Das Licht dreier Laserdioden in den Grundfarben Rot, Grün und Blau wird mittels je einer Kollimationslinse geformt, durch dichroitische Spiegel überlagert und auf einen Modulator gelenkt. Die verwendeten Dioden sind in Tab. 4.6 aufgelistet. Bei dem Modulator handelt es sich um einen Speckle Reducer, der aus zwei aufeinander folgenden, elastischen Membranen besteht, von denen eine zeitlich moduliert wird und als phasenmodulierender Diffusor dient. Auf diese Weise wird das vom System erzeugte Specklemuster hochfrequent durchmischte, so dass das menschliche Auge bedingt durch die eigene Integrationszeit ein durch die Mittelung stark specklereduziertes Bild wahrnimmt [74, 75, 76, 77]. Der Laserstrahl am Modulator muss dazu nicht vollständig kollimiert sein, sondern kann die volle Apertur nutzen, um einen maximalen Effekt zu erzielen.

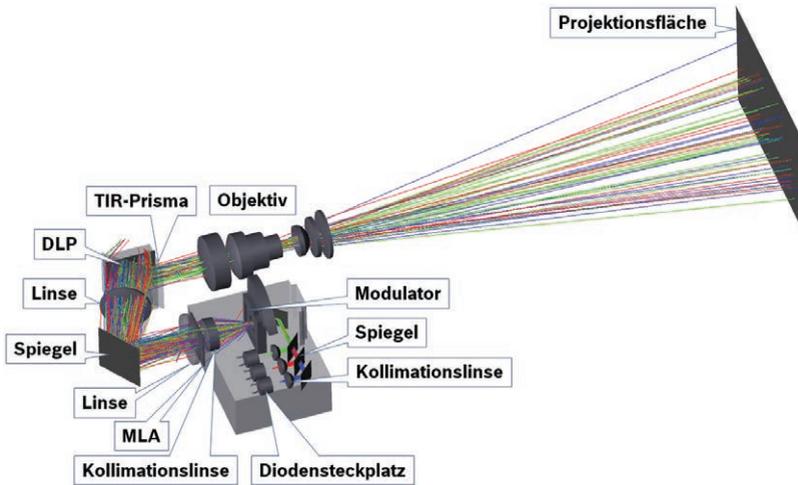


Abbildung 4.11: Simulation der Optiken eines laserbasierten DLP-Projektors.

Zur Synchronisierung der einzelnen Lichtfarben mit dem Bildaufbau des DLP-Chips wurde der unmodifizierte Beamer zunächst vermessen. Es wurden dazu einfarbige Bilder dargestellt und das Signal einer im Projektionsbereich befindlichen Photodiode abgegriffen und über ein Oszilloskop mit der Stromzufuhr einer Lichtquelle verglichen. Im laserbasierten Prototypen wird die Stromzufuhr der ursprünglichen LED über eine geringe Messimpedanz geleitet und die Spannung

Wellenlänge	Typ	Leistung
642 nm	TO56	ca. 100 mW
515 nm	TO56	ca. 100 mW
450 nm	TO56	ca. 150 mW

Tabelle 4.6: Kenndaten der für den Beameraufbau aus Abb. 4.11 verwendeten Laserdioden.

dort als Triggersignal für die Ansteuerung der Laserdioden abgegriffen. Das Ansteuern der Laserdioden erfolgt jeweils zeitversetzt zum Triggersignal entsprechend dem über das Oszilloskop ermittelten Verhalten. Die Dioden sind dabei über die Zeitdauer des Bildaufbaus der entsprechenden Farbe als Vereinfachung durchgehend aktiv, was zu Kontrastminderungen führt.

Der Modulator besitzt eine eigene Stromversorgung und lässt sich zu Demonstrationszwecken separat zuschalten. Die maximale Helligkeit ist in diesem Aufbau begrenzt durch die vergleichsweise schwache rote Laserdiode (vgl. Tab. 4.6) und die hier im Wesentlichen passive Kühlung. Es werden Lüfter zum Abtransport der Wärme eingesetzt, allerdings ohne die Austauschfläche per Kühlrippen zu vergrößern. Eine aktive Kühlung mit Temperaturregelung wurde in einem späteren Prototypen umgesetzt.

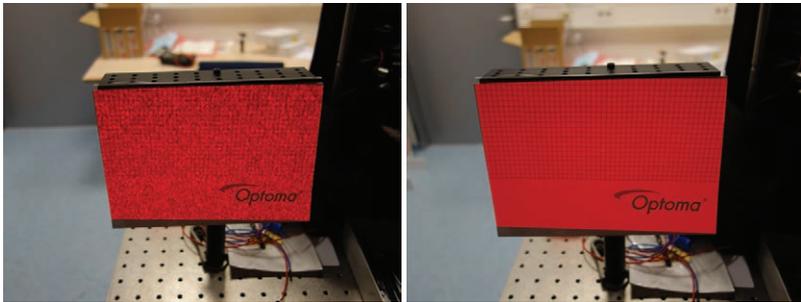


Abbildung 4.12: Qualitativer Vergleich der Specklebildung ohne (links) und mit (rechts) aktivem Modulator im untersuchten System. Dabei ist nur die rote Laserdiode aktiviert und es erfolgt eine Projektion auf einen Papierschirm.

Ein zunächst qualitativer Vergleich des Systems mit und ohne aktivem Modulator ist in Abb. 4.12 unter Darstellung einer roten Fläche dargestellt. Der Effekt der Specklereduktion ist darin deutlich erkennbar.

Abb. 4.13 zeigt die Aufnahme der Projektionsfläche bei Darstellung eines Testbildes mit aktivem Modulator und unter Einsatz aller drei zeitlich getriggerten Laserdioden. Es ist erkennbar, dass die verschiedenen Elemente in entsprechender Farbmischung wiedergegeben werden können.

Messwerte einer Charakterisierung des Projektionssystems sind in Tab. 4.7 dargestellt. Die auftretenden Speckle werden durch Aktivierung des Modulators um den Faktor 2,4 verringert.



Abbildung 4.13: Mehrfarbiges Testbild des realisierten Prototypen eines DLP-basierten Laserprojektors. Um den durch das Laserlicht bedingten, verfälschenden Weißabgleich der Kameraaufnahme zu korrigieren, wurde ein manueller Weißabgleich durchgeführt.

4.5.2 HOLOGRAPHISCHES HUD-SYSTEM

Projektionsflächen für Anzeigesysteme im Fahrzeug können holographisch umgesetzt werden [78]. Im HUD-System können effiziente, holographische Streuflächen an die jeweilige Abbildungsoptik angepasst werden, um das auf sie eingestrahlte Licht nahezu komplett in die vorgesehene Eyebox zu leiten [79]. In der Arbeit von Mayer [68] wurde dafür ein Aufnahmeverfahren entwickelt, dass in Abb. 4.14 schematisch dargestellt ist.

Messwerte DLP-Laserprojektion	
SW-Kontrast	645 : 1
4 % Kontrast innen	118 : 1
4 % Kontrast außen	166 : 1
Leuchtdichte	359 cd/m ²
Specklekontrast Weiß (unmoduliert)	15,3 %
Specklekontrast Weiß (moduliert)	6,3 %

Tabelle 4.7: Übersicht über einige Messwerte der laserbasierten DLP-Projektion im aufgebauten Prototypen.

In der links dargestellten Aufnahme wird das Licht einer Objektwelle aus der gewünschten Eyebbox heraus über die HUD-Optik auf das Hologramm eingestrahlt und mit einer Referenzwelle überlagert. Beim rechts dargestellten Abspielen wird das Hologramm durch den Projektor mit der umgekehrten Referenzwelle bespielt, um wieder die gewünschte Eyebbox zu erzeugen.

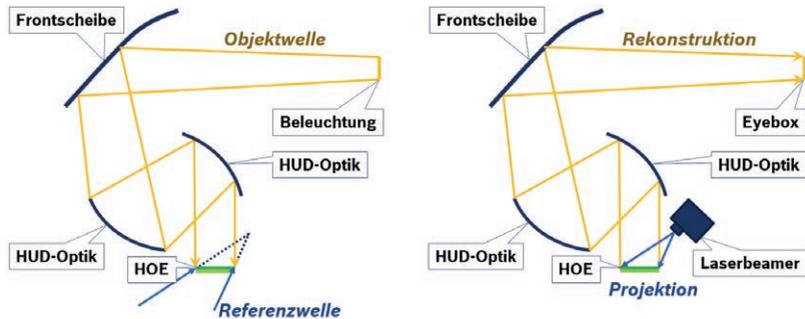


Abbildung 4.14: Links: Aufnahmeprinzip eines Hologramms als Projektionsfläche für ein laserbasiertes Head-up Display. Rechts: Abspielprinzip des entstandenen Reflektionshologramms. Jeweils eigene Darstellung in Anlehnung an [68].

Nach diesem Prinzip wurde für die Testoptik aus Kap. 4.1 ein Reflektionshologramm aufgenommen, um eine schmale Eyebox am Ort des Beobachterauges zu erzeugen.

Der Laboraufbau zur Aufnahme des Hologramms ist in Abb. 4.15 schematisch veranschaulicht. Dazu wurde ein bestehender Aufbau aus der Arbeit von Mayer [68] durch eine angepasste Strahlformung, sowie die Integration der schmalen Streufläche und der Testoptik modifiziert.

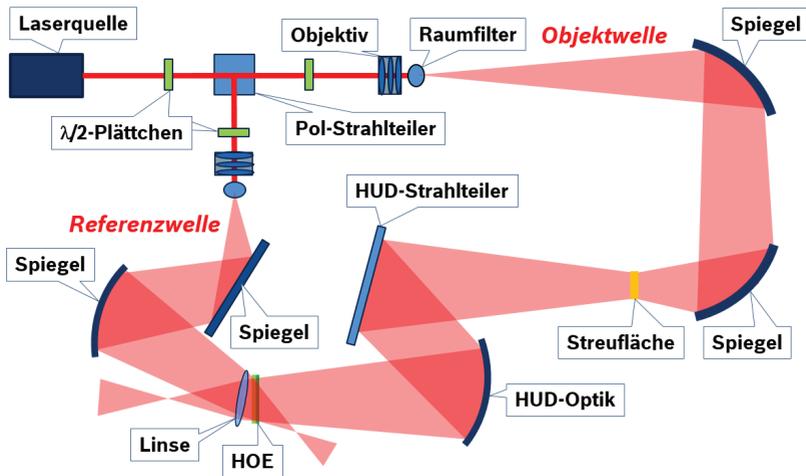


Abbildung 4.15: Aufbau zur Aufnahme eines auf eine HUD-Optik angepassten Hologramms basierend auf einem Verfahren aus der Arbeit von Mayer [68]. Die Objektwelle wird dabei aus einer gewünschten Eyebox heraus durch die HUD-Optik selbst geformt, um bei der Wiedergabe dieselbe Eyebox wieder zu erzeugen.

Verwendet wurde ein Laser der Wellenlänge 633 nm, dessen Strahl über einen Strahlteilerwürfel in Referenz- und Objektwelle aufgespalten wird. Das Teilungsverhältnis kann über das $\lambda/2$ -Plättchen eingestellt werden. Durch ein Objektiv mit anschließender Raumfilterung wird das Laserlicht der Objektwelle über mehrere Spiegel zur

Streufläche geleitet, die die gewünschte Form der schmalen Eyebox besitzt. Dort wird das Licht gestreut und strahlt über die HUD-Optik auf das Hologramm ein.

Die Referenzwelle wird entsprechend geformt und durchstrahlt das Hologramm hin zu einem Fokuspunkt. Der Fokuspunkt dient als spätere Position des Laserprojektors in Relation zum Hologramm, der das so aufgenommene Reflektionshologramm in der $-1.$ Ordnung abspielt. Mit Hilfe des $\lambda/2$ -Plättchens im Strahlengang der Referenzwelle kann die Polarisierung zur optimalen Einkopplung am Hologramm eingestellt werden. Das Plättchen im Strahlengang der Objektwelle dient der Anpassung auf die Polarisationsrichtung der Referenzwelle, um in der holographischen Schicht interferieren zu können.

Bei dem verwendeten holographischen Material handelt es sich um das Produkt *Bayfol HX 102* der Firma *Bayer* auf einem Polycarbonat-Substrat.

Das auf diese Weise aufgenommene Hologramm wurde mit dem entwickelten Laserprojektor und der Testoptik zur Realisierung eines Prototyps kombiniert. Die holographische Folie wurde dazu auf eine Glasplatte aufgetragen. Da das aufgenommene Hologramm nur auf die rote Laserwellenlänge wirkt, ist der Aufbau monochromatisch. Abb. 4.16 zeigt das aus der Eyebox heraus aufgenommene, virtuelle Bild bei vollflächiger Anzeige. Die Darstellung erfolgt in logarithmischer Skala, da das menschliche Auge Helligkeiten proportional zum Logarithmus der stimulierenden Intensität wahrnimmt [80].

Die Beugungseffizienz des Hologramms nimmt zum rechten Rand hin deutlich ab, wodurch sich dort das Bild verdunkelt. Ungleichmäßige Beugungseffizienzen können beispielsweise durch Inhomogenitäten bei der Beleuchtung in der Hologrammaufnahme entstehen. Die Wellenlänge des roten Lasers im Projektor weicht von der

Aufnahmewellenlänge um 9 nm ab, wodurch das Hologrammverhalten Abweichungen zu den Aufnahmewinkeln aufweist, was im System angepasst werden muss.

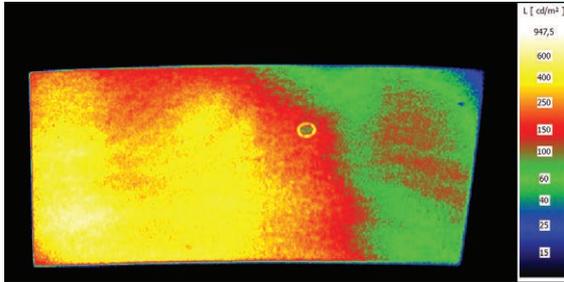


Abbildung 4.16: Virtuelles Bild bei vollflächiger Anzeige im HUD-Aufbau mit DLP-Laserprojektion und holographischer Projektionsfläche mit Testoptik. Logarithmische Darstellung über 2 Dekaden.

In Tab. 4.8 finden sich einige Messwerte des Systems. Der 4 % Kontrast wird durch die in Abb. 4.16 erkennbare Inhomogenität des Bildes gemindert.

Messwerte holographisches HUD	
SW-Kontrast	360 : 1
4 % Kontrast innen	43 : 1
4 % Kontrast außen	39 : 1
Leuchtdichte	263 cd/m ²
Übersprechen	0,12 %
Granulation	9,5 %

Tabelle 4.8: Übersicht über einige Messwerte eines realisierten Prototypen mit DLP-Laserprojektion auf eine aufgenommene, holographische Streufläche.

Bedingt durch die Hologrammaufnahme entsteht außerdem trotz der Unterdrückung von Specklen mit Hilfe des Modulators eine Granulation im Bild. Der Einsatz der Streufläche bei der Aufnahme führt bereits zu einem in das Hologramm eingebrachten, fest stehenden Specklemuster. Dieses Muster wird beim Abspielen rekonstruiert und kann nicht mehr durch die Phasenmodulation durchmischelt werden. Es handelt sich daher nicht um Speckle im eigentlichen Sinne. Eine Maßnahme zur Verbesserung besteht in der Mehrfachbelichtung unter jeweiliger Verschiebung der Streufläche in der Eyebox, um das einbelichtete Specklemuster zu mitteln. Zu erwarten ist hier eine Verbesserung um den Faktor \sqrt{n} bei n Belichtungen [81, 82].

In Abb. 4.17 ist eine Aufnahme der Eyeboxform auf einem Schirm in der Gesamteyebox dargestellt. Das System mit Laserprojektor, holographischer Projektionsfläche und Testoptik ist dabei in der Lage, eine definierte, scharfe Eyebox zu erzeugen.

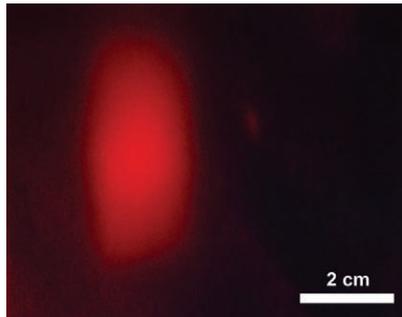


Abbildung 4.17: Eyeboxform des Systems mit DLP-Laserprojektion auf eine holographische Projektionsfläche.

Um das System als autostereoskopisches HUD zu realisieren, kann ein zweiter Projektor eingesetzt werden, dessen Einstrahlwinkel auf das

Hologramm mit einer anderen optischen Funktion verarbeitet wird. Die Verwendung eines Hologramms mit unterschiedlichen optischen Funktionen für zwei einstrahlende Projektoren ist aus nicht stereoskopischen Systemen bekannt [83].

Eine mögliche Nachführung, bei der das Reflektionshologramm selbst gedreht wird, ist in Abb. 4.18 links dargestellt. Die beiden Projektoren strahlen aus unterschiedlichen Richtungen auf die Projektionsfläche. Durch die Winkelselektivität des Hologramms lassen sich so unterschiedliche optische Funktionen und damit Abstrahlrichtungen für die beiden Teilbilder erreichen. Durch die Drehung nimmt zwar die Beugungseffizienz ab, da sich der Projektor aus der Aufnahmebedingung heraus bewegt, allerdings lassen sich kleine Winkeländerungen zur Verschiebung der Eyeboxen im Designbereich ohne wesentlichen Lichtverlust erreichen.

In der rechts in der Abbildung dargestellten Variante eines Transmissionshologramms wird die gesamte Anordnung aus Projektoren und Projektionsfläche gedreht. Die Projektoren müssen anders als hier schematisch dargestellt nicht zwingend schräg auf die Projektionsfläche strahlen. Mittels einer off-axes-Projektion kann die optische Achse des Objektivs senkrecht auf das Hologramm zulaufen.

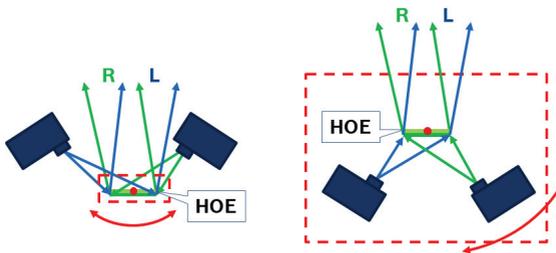


Abbildung 4.18: Mögliche Nachführkonzepte für HUDs auf Basis einer Laserprojektion auf eine holographische Projektionsfläche.

Alternative Designansätze für Systeme zur Realisierung eines auto-stereoskopischen Systems mit nur einem Projektor finden sich im Anhang in Kap. A.2.1 auf S. 228.

Die Reduktion der Speckle kann im System durch andere oder zusätzliche Maßnahmen verbessert werden. Neben den in Kap. 4.4 genannten Methoden können alternative, zeitlich modulierende Elemente [84] oder bewegte Projektionsflächen eingesetzt werden [85, 86]. Durch das laserbasierte Konzept kann die Hinterleuchtung des Bildgebers im Projektor ebenfalls holographisch erfolgen [87]. Auch spezielle Konzepte wie beispielsweise der Einsatz von gradient-index Mikrolinsen (GRIN) sind anwendbar [88].

4.5.3 WEITERENTWICKLUNG DES PROJEKTIONSSYSTEMS

Der in Kap. 4.5.1 vorgestellte Laserprojektor wurde weiterentwickelt und in Zusammenarbeit mit dem Bosch Forschungsmusterbau in einem weiteren Prototypen realisiert [89]. In einer im Rahmen dieser Arbeit betreuten Masterarbeit wurden optische Simulationen des Systems in verschiedenen Konfigurationen durchgeführt und messtechnische Charakterisierungen des Prototypen vorgenommen [90]. Der verbesserte Prototyp umfasst die folgenden Maßnahmen:

- Integration lichtstarker Multimode-Laserdioden
- Steigerung der Systemeffizienz im optischen Design
- Jeweils eigene thermische Stabilisierung der Dioden durch Peltier-Elemente
- Maximierung des Despeckle-Effekts durch Phasenmodulation
- Integration eines Dimmkonzepts zur Helligkeitsanpassung

Der Einsatz von lichtstarken Multimode-Laserdioden verbreitert das Spektrum der einzelnen Lichtfarben, liegt aber immer noch in einem von Hologrammen verarbeitbaren, engen Bereich. Die Verbreiterung wirkt sich positiv auf die Specklereduktion aus. Zusammen mit der Erhöhung der Lichtleistung steigt auch die abzutransportierende Verlustwärme der Dioden. Der effiziente Betrieb des Systems erfordert daher die thermische Stabilisierung der Dioden. Der Arbeitspunkt der einzelnen Dioden ist individuell festlegbar, was für eine Feinjustage der Laserwellenlänge oder eine Maximierung des Lichtoutputs bzw. der Effizienz genutzt werden kann. Die zur Stabilisierung eingesetzten Peltier-Elemente arbeiten im geregelten Betrieb auf Basis eines PTC-Messwiderstandes und sind mit Kühlrippen verbunden, die selbst wiederum durch Lüfter gekühlt werden.

Um das Helligkeitsniveau dem Umgebungslicht anpassen zu können, wurden verschiedene Dimmkonzepte untersucht. Ein Ansatz bestand in der Integration einer LCD-Zelle mit anschließendem Polarisationsfilter in den optischen Strahlengang. Da die Laserdioden ohnehin linear polarisiertes Licht abstrahlen, kann so durch Drehung der Polarisationsrichtung in der LCD-Zelle der transmittierte Anteil eingestellt werden. Ein weiteres, untersuchtes Konzept liegt im hochfrequenten Pulsbetrieb der Laserdioden.

Auf die Ausführung detaillierterer Ergebnisse der Analyse und des Konzeptaufbaus soll an dieser Stelle verzichtet werden.

4.6 FAZIT

Projektionsbasierte PGU-Konzepte mit einem DLP-Chip als Bildgeber profitieren von einer hohen Systemeffizienz und erreichen hohe Leuchtdichten. Für das Erreichen einer hohen Bildqualität ist die Wahl

der Projektionsfläche entscheidend, die zu negativen Effekten wie Kontrastverlusten oder Inhomogenitäten im Bild führen kann.

Das untersuchte Konzept der LED-basierten DLP-Projektion auf angepasste Mikrolinsenstrukturen erreichte eine hohe Bildqualität, allerdings nutzt der stereoskopische Aufbau zwei Projektoren zur Generierung der beiden Teilbilder. Bei der DLP-Technologie handelt es sich um ein von der Firma *Texas Instruments* vertriebenes Produkt. Vergleichbare MEMS-Elemente zur Realisierung eines Bildgebers für Projektionssysteme sind derzeit auf dem Markt nicht verfügbar. Durch diese Marktsituation ergeben sich für die Technologie entsprechende Abhängigkeiten und Kosten in Bezug auf den Bildgeber. Die auf zwei DLP-Chips basierenden Bildgebereinheiten sind daher als kostenintensiv einzuschätzen.

Der PGU-Aufbau als Projektionssystem erschwert die Nachführung der generierten Eyeboxen. Es ist prinzipiell möglich, die Eyeboxen durch eine Rotation der gesamten PGU nachzuführen, allerdings sind dabei vergleichsweise große Massen nachzuführen und es entstehen damit verbundene, mechanische Latenzzeiten.

Das untersuchte System mit auf günstigeren Mikrospiegeln basierenden Flying Spot Laserprojektoren mit angepasstem Mikrolinsenraster als Projektionsfläche erweitert den Farbraum und ermöglicht durch das Abschalten des Lasers bei nicht benötigten Pixeln potentiell hohe Kontraste. Die Vermeidung von Speckleeffekten ist in diesem Konzept mit einem hohen Aufwand verbunden, der eine sehr genaue Justage der Elemente mit einschließt. Bei Verwendung eines einzelnen Linsenrasters zur Aufweitung der Laserstrahlen über die zu formenden Eyeboxen ist die Eyeboxgröße durch die realisierbare Brechkraft der Linsen limitiert.

Die Reduktion auf Laserwellenlängen ermöglicht den Einsatz holographischer Projektionsflächen, durch die eine speziell an das HUD-System angepasste Abstrahlcharakteristik realisiert werden kann. Eine holographische Realisierung der Mikrolinsenfunktion kann durch eine Aufweitung der Laserstrahlen ähnlich den Mikrolinsen Speckle vermeiden. Das Konzept ermöglicht auch die Integration holographischer Abbildungsoptik in die Frontscheibe, wodurch der vom System eingenommene Bauraum drastisch reduziert werden kann. Bei der Integration holographischer Schichten in die Frontscheibe ist auf mögliche Blendeffekte zu achten, die durch die Rekonstruktion des Hologramms durch Sonnenlicht verursacht werden.

Im Konzept auf Basis einer DLP-basierten Projektion auf eine holographische Projektionsfläche konnten die entstehenden Speckle durch eine Phasenmodulation des Laserlichts im modifizierten Projektor effektiv reduziert werden. Der entwickelte Projektor kann mit verschiedenen Projektionsflächen kombiniert werden und lässt sich auch in anderen, nichtstereoskopischen Systemen einsetzen. Er eignet sich auch für Konzepte mit zusätzlichen holographischen Optiken mit Abbildungsfunktion.

Technische Herausforderungen liegen in der Realisierung der holographischen Projektionsfläche, die bei der Umsetzung als Streufläche aufgrund von Specklebildung bei der Hologrammaufnahme zu Granulation im Bild führen kann. Getrennte optische Funktionen für einzelne Pixel vermeiden diesen Effekt, sind aber durch die einbelichtete Pixelgröße in ihrer Auflösung limitiert.

KAPITEL 5

LCD-BASIERTE HUDS

In diesem Kapitel wird auf autostereoskopische HUD-Konzepte, basierend auf LCD-Technologie, als eine zweite Hauptgruppe der untersuchten Ansätze eingegangen. Im ersten Teil wird die Auswahl eines spezifischen Konzepts getroffen, das im Folgenden evolutionär über drei realisierte Prototypen weiterentwickelt und schließlich ins Fahrzeug integriert wird. Weiterhin wird ein auf Lentikularlinsen beruhender, autostereoskopischer Ansatz mit nur einer LCD-Zelle simulativ und prototypisch untersucht.

5.1 LCD-STRAHLTEILERKONZEPT

Um einen stereoskopischen Bildeindruck zu erzeugen, muss die Bildgebereinheit separate Teilbilder erzeugen und dem jeweiligen Auge zuführen. Ein solches System kann mit einer LCD-Zelle prinzipiell realisiert werden, indem die Zelle mit zwei getrennt ansteuerbaren Hinterleuchtungen versehen wird, wobei jede Hinterleuchtung die LCD derart durchstrahlt, dass das Licht in jeweils eine schmale Eyebox gelangt.

Der Bildinhalt kann zeitsequentiell zwischen den beiden Teilbildern umgeschaltet werden, wobei jeweils die zugehörige Hinterleuchtung aktiviert wird. Ein solches Konzept erfordert eine LCD-Zelle, die ausreichend schnell umschalten kann, um auch unter Automotivebedingungen notwendige Bildfrequenzen für beide Teilbilder, wie

beispielsweise 60 Hz zu liefern. Aktuell erhältliche LCD erfüllen diesen Anspruch nicht.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, einzelne Pixel der LCD-Zelle einem bestimmten Teilbild zuzuweisen und die Abstrahlung derart zu formen, dass die Pixel nur aus bestimmten Bereichen der Gesamteyebox gesehen werden können. Eine räumliche Zuordnung der Pixel zu bestimmten Eyeboxbereichen kann beispielsweise durch der LCD-Zelle nachfolgende Lentikularlinsen erreicht werden. Ein entsprechendes Konzept findet sich in Kap. 5.5. Darin wird ein Auflösungsverlust in Kauf genommen, um die Autostereoskopie mit einer einzelnen LCD-Zelle zu realisieren.

Abb. 5.1 zeigt ein alternatives Konzept, bei dem eine LCD-Zelle mittels eines Strahlteilers virtuell mit einer zweiten Zelle überlagert wird. Beiden Zellen wird jeweils ein Teilbild aufgeschaltet und sie werden derart hinterleuchtet, dass sie nur in bestimmte Raumwinkel abstrahlen, um das Licht innerhalb einer Eyebox zur Verfügung zu stellen. Im virtuellen Bild erscheinen die beiden Punkte der beiden Teilbilder an derselben Stelle.

Durch diesen Ansatz kann Autostereoskopie unter Automotivebedingungen bei voller Bildauflösung im jeweiligen Teilbild erreicht werden. Nachteilig sind der erhöhte Kostenaufwand durch den zweiten Bildgeber, sowie der erhöhte Bauraumbedarf für die zweite Hinterleuchtung. Im Falle einer mechanischen Nachführung durch Rotation der gesamten Bildgebereinheit entsteht durch deren hohe Gesamtmasse mechanische Latenz. Eine alternative Methode zur Nachführung mit geringer nachzuführender Masse wird in Kap. 5.4 vorgestellt.

Um eine gezielte Formung der Abstrahlcharakteristik an der LCD-Zelle durch die Hinterleuchtung zu ermöglichen, darf die LCD-Zelle

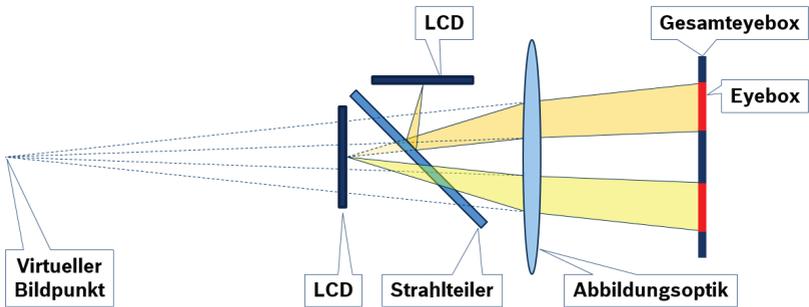


Abbildung 5.1: Strahlteilerkonzept für ein LCD basiertes, autostereoskopisches HUD-Konzept. Die Bildpunkte der beiden LCDs werden mittels eines Strahlteilers überlagert und über die jeweilige Eyebox als virtueller Punkt abgebildet.

selbst möglichst keine eigene Streuung aufweisen. Bei anderen LCD-Anwendungen, wie beispielsweise Monitoren, ist eine Abstrahlung in einen breiten Raumwinkel erwünscht. Dort kann eine Streuung in der LCD sogar homogenisierend wirken. Schichten zum Polarisationsrecycling oder Klebeverbindungen zwischen den LCD-Schichten weisen daher mitunter Streuung auf. Für die im Rahmen dieser Arbeit aufgebauten Prototypen wurde daher eine für Automotiveanwendungen entwickelte 3,1" LCD-Zelle der Firma *JDI* verwendet, die eine sehr geringe Streuung aufweist.

Strahlteilerwahl

Eine Überlagerung der beiden Displays kann durch Mehrfachreflektionen innerhalb des Strahlteilers zu Doppelbildern führen. Verschiedene Strahlteiler wurde daher getestet und auf ihre Eignung für das Konzept evaluiert.

Ein konventioneller Strahlteiler mit verspiegelter Vorderseite und breitbandentspiegelter Rückseite zeigte keine ausreichende Doppelbildunterdrückung. Zudem zeigen typische Verspiegelungen eine vergleichsweise hohe Winkelabhängigkeit. Ein weiterer Ansatz bestand in der Verspiegelung von Dünnglasscheiben, die bedingt durch ihre Dicke ein Doppelbild erzeugen, das sehr nahe am originalen Bild liegt und von diesem dadurch kaum unterscheidbar ist. Die Verspiegelung erfolgte durch Aufdampfen dünner Aluminiumschichten deren Dicke mit einem von Bosch entwickelten Programm berechnet wurde [91].

Abb. 5.2 zeigt das Ergebnis der Berechnung. Die Transmission ist nach Berechnung bei Schichten von etwa 3 nm Dicke geeignet, um als Strahlteiler zu wirken. Die tatsächliche Dicke kann beispielsweise bedingt durch die Oxidationsschicht auf dem Aluminium abweichen. Durch die geringe Winkelabhängigkeit eignet sich der Strahlteiler für Konzepte mit unterschiedlichen Einstrahlwinkeln.

Ausgehend von diesen Daten wurden außerhalb dieser Arbeit Bedampfungstests an Dünnglasscheiben durchgeführt. Die hergestellten Samples zeigten geeignete Transmission und Reflektion für den Einsatz als Strahlteiler. Sehr dünne Substrate unter 100 μm Dicke neigen allerdings zu unebenen Oberflächen und führen zu Verzerrungen des reflektierten Bildes.

Zur Realisierung der autostereoskopischen Konzepte wurde die Entscheidung für einen polarisationsabhängigen Strahlteiler auf Wire Grid Basis getroffen. Diese Technologie erlaubt den Einsatz über weite Winkelbereiche und zeigt eine noch gleichmäßigere Transmission bei den verschiedenen Wellenlängen.

Das Licht einer LCD-Zelle ist naturgemäß polarisiert und kann entsprechend auf den Strahlteiler angepasst werden. Der Wire Grid

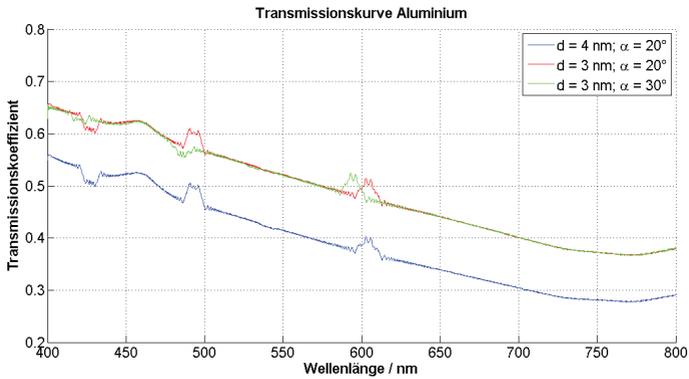


Abbildung 5.2: Berechnete Transmissionskurven für dünne Aluminiumschichten. Dabei ist d die Dicke der Al-Schicht und α der Winkel des durchstrahlenden Lichts. Die Berechnung erfolgte mit Hilfe eines von Bosch entwickelten Programms [91].

Strahlteiler zeigt durch seine hohe Polarisationsabhängigkeit kein wahrnehmbares Doppelbild.

Polarisationsanpassung

Bei der Überlagerung der beiden LCD-Zellen mittels des Strahlteilers ist die Polarisation der beiden Zellen idealerweise an den Strahlteiler angepasst. Dadurch würde das Licht der LCD den Strahlteiler näherungsweise vollständig passieren bzw. reflektiert werden. Die überlagerten Teilbilder stehen dann in gekreuzter, linearer Polarisation zueinander. Hierfür werden LCD-Zellen benötigt, deren lineare Polarisierungen ebenfalls senkrecht zueinander stehen.

Um die zur Verfügung stehenden LCD-Zellen mit gleicher Polarisationsrichtung anzupassen, wurden Tests mit der Auflamination einer zusätzlichen $\lambda/4$ -Folie auf einer der Zellen zur Drehung der

Polarisationsrichtung durchgeführt. Die Polarisationsrichtung konnte auf diese Weise angepasst werden, allerdings führte die Folie zu erhöhter Streuung, wodurch sich das Übersprechen des Systems deutlich verschlechterte.

Aus diesem Grund wurde die Entscheidung getroffen, die Prototypen ohne zusätzliche Polarisationsdrehung aufzubauen. Die Polarisationsrichtungen, die vom Strahlteiler reflektiert bzw. transmittiert werden, stehen beide um 45° bzw. -45° gedreht, diagonal und senkrecht aufeinander im Raum. Ein Teil des von den LCD-Zellen stammenden Lichts bleibt dadurch ungenutzt. Um den streuenden Effekt der $\lambda/4$ -Folie zu eliminieren, wird eine Lamination der Folie zwischen dem Abdeckglas der LCD-Zelle und einer weiteren Glasschicht empfohlen. Alternativ kann der Aufbau der LCD angepasst werden, um bereits die benötigte Richtung der linearen Polarisation zu liefern. Das angewandte Prinzip der in den Prototypen umgesetzten Strahlteilerlösung ist in Abb. 5.3 veranschaulicht.

Eine Polarisationsanpassung kann auch aufgrund der unterschiedlichen Reflexion von p- und s-Polarisation an der Frontscheibe durchgeführt werden. Das Licht des HUD-Systems trifft die Frontscheibe oftmals nahe dem Brewsterwinkel, bei dem die p-Polarisation eine sehr geringe Reflexion erfährt. Die Bildhelligkeit kann durch die Verwendung reiner s-Polarisation dadurch zwar maximiert werden, allerdings wird die s-Polarisation durch polarisationsabhängige Sonnenbrillen ausgefiltert. Solche Sonnenbrillen sind entwickelt um Sonnenreflexionen auf horizontalen Flächen zu mindern, deren bevorzugte Polarisationsrichtung in etwa mit der s-Polarisation des HUD-Systems übereinstimmt.

Um eine gleich starke Reflexion der beiden Teilbilder an der Frontscheibe zu gewährleisten und um eine Transmission der beiden Teilbilder durch die angesprochenen Sonnenbrillen zu ermöglichen,

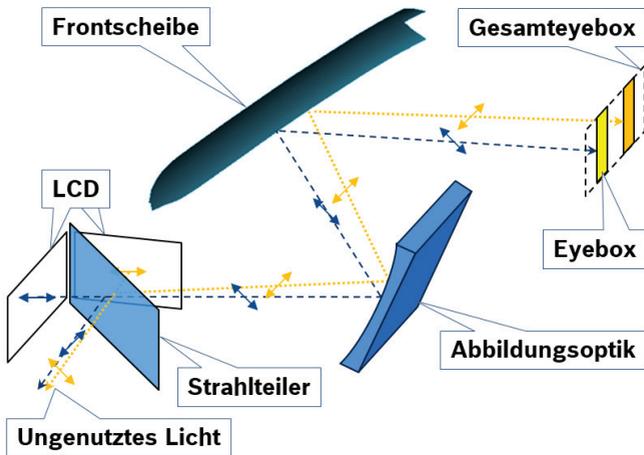


Abbildung 5.3: Veranschaulichung der Polarisationen im Strahlteilerkonzept. Der Strahlteiler überlagert die diagonalen Anteile der Displaypolarisationen.

ist daher eine diagonale, senkrecht aufeinander stehende Polarisation der beiden Teilbilder mit gleichen p- und s-Anteilen vorteilhaft.

5.2 LABORDEMONSTRATOR MIT LCD-BILDGEBER

Als ein erster Prototyp auf LCD-Basis wird in diesem Abschnitt ein Labordemonstrator vorgestellt. Es wird eine mechanische Nachführung in Verbindung mit einem Head-Tracking System realisiert und optimiert, das den 3D-Eindruck erfahrbar macht. Die messtechnische Charakterisierung des Systems dient als Grundlage für weitere Konzeptentwicklungen und prototypische Aufbauten, die in weiteren Abschnitten vorgestellt werden.

5.2.1 STREUFLÄCHENBASIERTE HINTERLEUCHTUNG

Um die Eyebox eines Head-up Displays zu erzeugen, muss das Display der Bildgebereinheit ihr Bild in schmalen Kegeln abstrahlen, die in die Eyebox führen. Beim autostereoskopischen HUD sind dies einzelne, schmale Eyeboxen von beispielsweise 20 mm Breite. Diese schmalen Zielfenster erfordern eine Streuung von geringer Öffnungsbreite. Ein Ansatz hierfür ist die Verwendung einer Streufläche, die in schmale Winkel streut. Eine solche Streufläche kann direkt hinter der LCD positioniert werden und wird mit dem Licht einer LED beleuchtet (vgl. Abb. 5.4).

Um schmale, definierte Eyeboxen zu erzeugen, werden Abstrahlkegelbreiten von einigen wenigen Grad am Display benötigt. Streuflächen, die diesen schmalen Winkelbereich erzeugen, weisen auch bei der Hinterleuchtung mit LED Licht eine Granulation auf, die den von laserbeleuchteten Projektionsflächen bekannten Speckel ähnlich ist. In Abb. 5.5 ist die Leuchtdichtemessung auf einem LC-Display dargestellt, das mit einer weißen LED (Osram Golden Dragon) hinterleuchtet wurde. Hinter der LCD befand sich dabei eine Streufläche der Firma *Luminit*, welche in $60^\circ \times 1^\circ$ streut (vertikal \times horizontal).

Es handelt sich dabei um eine spezielle Streufläche, die sowohl auf refraktiven, als auch diffraktiven Effekten beruht. Das Bild weist trotz der Hinterleuchtung mittels der inkohärenten LED eine deutliche Granulation auf. Diese Granulation findet sich auch in der virtuellen Abbildung des Displays über die HUD-Optik wieder.

Um die Granulation im virtuellen Bild zu verringern, kann die Projektionsfläche bewegt werden [85]. Mit der Bewegung ändert sich auch das Muster der Granulation. Durch die Integrationszeit des Auges bei der Wahrnehmung des Bildes wird dann über mehrere Teilbilder gemittelt und die wahrgenommene Granulation wird verringert.

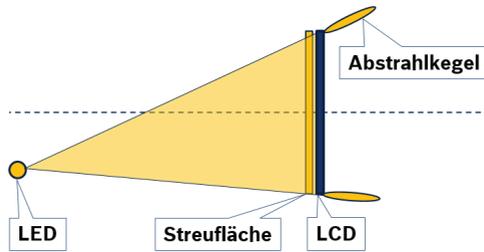


Abbildung 5.4: Funktionsprinzip einer mittels einer LED hinterleuchteten LCD mit einer Streufläche. Das Licht der LED wird an der Streufläche derart gestreut, dass schmale Abstrahlkegel entstehen, die die LCD durchleuchten. Diese schmale Abstrahlcharakteristik führt über die anschließende HUD-Optik zu schmalen Eyeboxen.

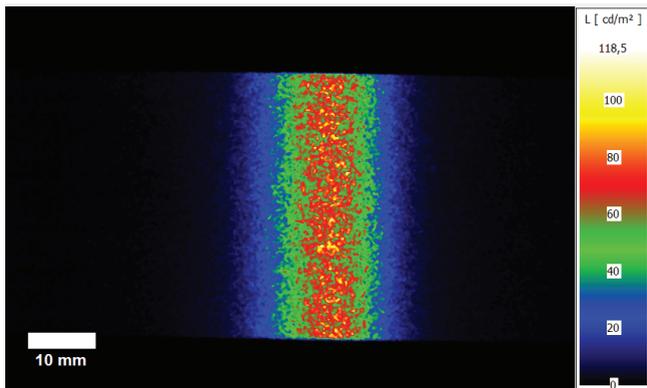


Abbildung 5.5: Leuchtdichtebild einer 3,1'' LCD mit LED-Hinterleuchtung in linearer Skalierung. Hinter der LCD befindet sich eine Streufläche der Firma *Luminit*, die in $60^\circ \times 1^\circ$ streut. Im Bild ist eine durch die Streufläche verursachte Granulation erkennbar, die sich auch in der Abbildung des Displays wiederfindet.

In einem Laboraufbau wurde ein System nach Abb. 5.4 über einen Freiformspiegel abgebildet und das virtuelle Bild mittels einer Leuchtdichtekamera aufgenommen. Die in der Hinterleuchtung verwendete

Streufläche aus Abb. 5.5 wurde dabei zwischen verschiedenen Aufnahmen um jeweils $100 \mu\text{m}$ verschoben und jeweils die Granulation bestimmt. Das Ergebnis der Auswertung findet sich in Abb. 5.6. Das durch die Streufläche entstandene Muster der Granulation wurde dabei durch die Bewegung der Streufläche mit verschoben. Aus der Abbildung ist erkennbar, dass sich die wahrgenommene Granulation bei Mittelung über 16 Teilbilder auf etwa die Hälfte reduziert.

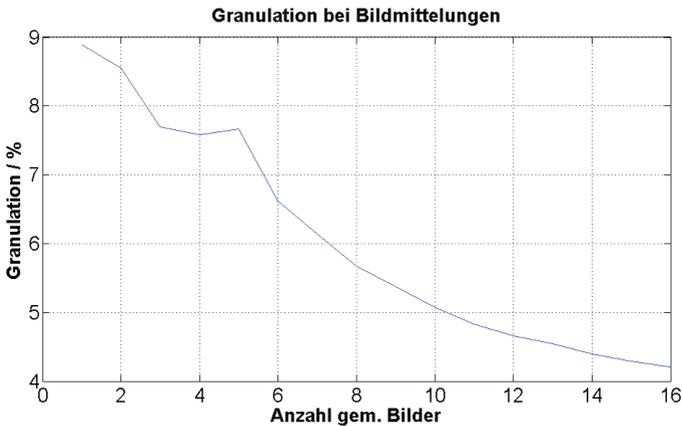


Abbildung 5.6: Dargestellt ist die bestimmte Granulation einer mit einer LED hinterleuchteten LCD-Zelle, hinter der sich eine $60^\circ \times 1^\circ$ Streufläche der Firma *Luminit* befindet. Die Granulation wurde bei Mittelung des Bildes über mehrere Aufnahmen bestimmt, die jeweils nach einer Verschiebung der Streufläche um $100 \mu\text{m}$ erfasst wurden.

Aus mechanischen Gründen ist die Modulation der Position der Streufläche limitiert. Insbesondere bei specklereichen Laserhinterleuchtungen oder bei Flying Spot Verfahren mit sehr kurzer Aufbauzeit eines einzelnen Pixels sind dem Verfahren der bewegten Streufläche Grenzen gesetzt. Zusätzlich bietet die Streufläche eingeschränkte Möglichkeiten bei der Form der Abstrahlung. Typischer Weise besitzt

eine Streufläche ein gaußförmiges Abstrahlprofil. Dadurch wird die über die HUD-Optik erzeugte Eyebox inhomogen ausgeleuchtet. Als Alternative zur streuflächenbasierten Hinterleuchtung werden daher im Folgenden Ansätze einer auf Mikrolinsenarrays basierenden Hinterleuchtungseinheit untersucht, die speziell auf die Anwendung im autostereoskopischen HUD angepasst sind.

5.2.2 HINTERLEUCHTUNG MIT STRAHLFORMENDER HOMOGENISIERUNG

Als eine Alternative zu Streuflächen, die direkt hinter dem LCD-Modul die notwendigen Abstrahlkegel formen, können Mikrolinsenarrays benutzt werden. Die in Kap. 4.2 vorgestellten, gekreuzten Zylinderlinsenarrays können neben ihrer Funktion als Projektionsfläche auch als Streuflächenersatz hinter einer LCD-Zelle eingesetzt werden. In Kap. 5.3 wird ein solches Konzept zum Aufbau eines Frontscheiben-Prototyps angewendet.

Die Hinterleuchtung eines Displays der Bildgebereinheit muss, um dem Betrachter ein einheitlich helles Bild anzubieten, homogenisiert werden. Die Lambert'sche Abstrahlcharakteristik einer einzelnen LED kann beispielsweise durch eine auf Mikrolinsenarrays basierende Homogenisierung derart geformt werden, dass sie eine Projektionsfläche gleichmäßig beleuchtet [92].

Im Folgenden wurde ein Ansatz untersucht, bei dem eine Homogenisierung der Hinterleuchtung gleichzeitig derart ausgelegt und modifiziert wird, dass zusätzlich zur Homogenisierung die für die autostereoskopische Funktion notwendige Abstrahlcharakteristik des Displays erzeugt wird. In Abb. 5.7 ist die Simulation für eine Bildgebereinheit dargestellt, die die Hinterleuchtung für ein einzelnes

Auge enthält. Das Licht einer LED des Typs Golden Dragon der Firma Osram wird dabei mittels eines Reflektors gesammelt und in Richtung zweier Mikrolinsenarrays geleitet. Die Mikrolinsen trennen das Licht in mehrere Kanäle auf, die über die darauffolgende Linse auf dem Display überlagert werden. Eine zusätzliche Feldlinse direkt vor dem Display engt den Bereich der Abstrahlung am Display zusätzlich ein.

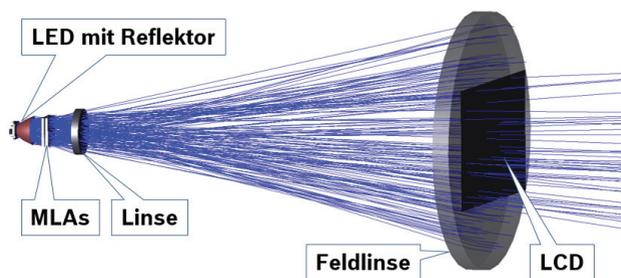


Abbildung 5.7: Aufbau einer Bildgebereinheit auf Basis einer MLA-Homogenisierung. Das Licht einer Osram Golden Dragon LED wird mittels zweier Mikrolinsenarrays, einer abbildenden Linse und einer Feldlinse derart auf das Display geführt, dass die gewünschte Abstrahlcharakteristik am Display entsteht.

Die Abstrahlkegelrichtung am Display kann hier mittels der Abstände zwischen den Elementen und mittels des Krümmungsradius der Feldlinse eingestellt werden. Die Breite der Mikrolinsenarrays nimmt in gewissem Abstand zur Displayfläche einen definierten Raumwinkel ein und legt damit die Öffnungsbreite der Abstrahlkegel am Display fest. Die Hinterleuchtung wurde bereits derart ausgelegt, dass sie in Kombination mit der in Kap. 4.1 vorgestellten Testoptik eine schmale Eyebox für das rechte Auge erzeugt. Abb. 5.8 zeigt das Ergebnis der Anpassung.

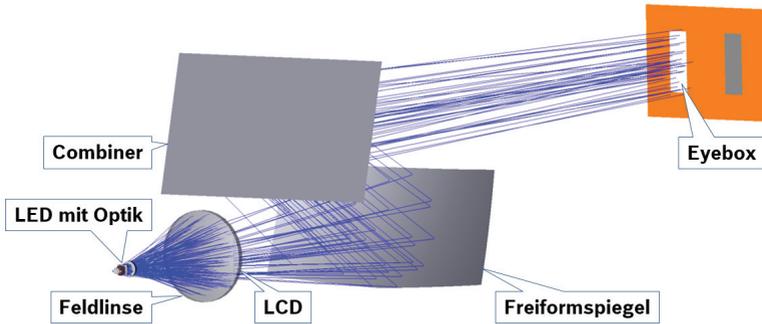


Abbildung 5.8: Simulation einer HUD-Optik mit einer Bildgebereinheit auf MLA-Basis, die eine Eyebox für das rechte Auge erzeugt.

Die Simulation beruht auf Mikrolinsenarrays, deren Substrate quadratisch sind und eine Kantenlänge von 10 mm besitzen. Diese Mikrolinsen führen zu einer homogen ausgeleuchteten, quadratischen Fläche am Display. Durch das Seitenverhältnis von 5:3 am Display wird überschüssiges Licht abgeschnitten. Unmittelbar nach dem Display wurde eine Blende integriert, die das Display mit einem Bildinhalt versieht. Abb. 5.9 zeigt die Form der Blende und damit den ins virtuelle Bild abgebildete Bildinhalt. Der schwarze Rand steht dabei über das Display hinaus. Die homogenisierte Beleuchtung am Display ist in Abb. 5.10 gezeigt. Darin ist erkennbar, dass die Displayfläche gleichmäßig ausgeleuchtet wird. Das anschließend von der Abbildungsoptik umgeleitete Licht trifft die Eyebox mit der in Abb. 5.11 gezeigten Ausleuchtung.

Rechts in der Abbildung ist erkennbar, welcher Anteil des Lichts am Zielbereich der Eyebox vorbei geführt wird. Der geringe Anteil zeigt, dass mit der simulierten Bildgebereinheit eine definierte Eyebox erzeugt wurde. Symmetrisch zur Mitte befände sich im realen Aufbau eine Eyebox für das zweite Auge. Ein Übersprechen in diesen Bereich findet simulativ nicht statt.

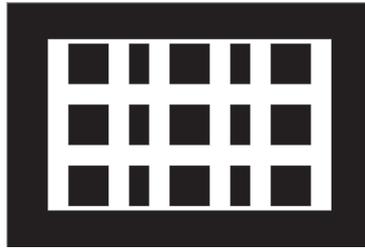


Abbildung 5.9: Blendenform der in der Simulation aus Abb. 5.8 verwendeten Blende. Das weiße Gitter füllt dabei das komplette Display aus. Durch die Ablendung der schwarzen Flächen nach dem Display wird ein Bildinhalt simuliert, der über die HUD-Optik abgebildet wird.

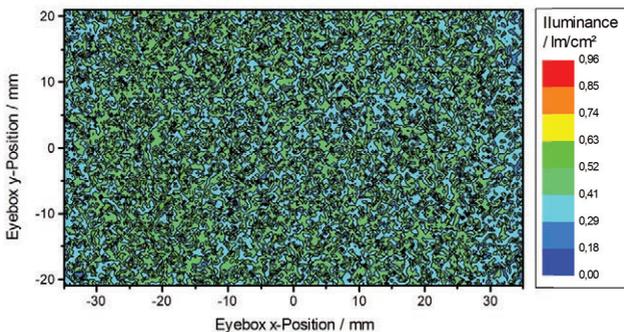


Abbildung 5.10: Homogenisierte Ausleuchtung des Displays einer Bildgebereinheit mit Hinterleuchtung auf MLA-Basis. Diese simulierte Form der Hinterleuchtung kann beispielsweise für eine LCD-PGU angewendet werden.

Die Ausleuchtung der Eyebox allein ist noch keine Garantie dafür, dass der komplette Bildinhalt des Displays für ein Betrachterauge in der Eyebox sichtbar ist. Durch die Integration eines Beobachterauges, wie bereits in Kap. 2.3.3 beschrieben, kann das wahrgenommene Bild überprüft werden. Die durchgeführte Simulation geht dabei von einem Betrachterauge mit einer Eintrittspupille von 8 mm Durchmesser aus.

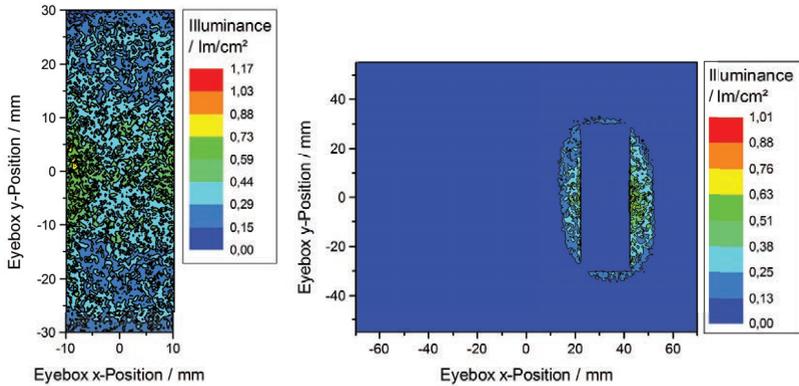


Abbildung 5.11: Links: Ausleuchtung der Eyebox für das rechte Auge bei Simulation einer MLA-basierten PGU. Rechts: Darstellung des detektierten Lichts in der Gesamteybox.

Das Ergebnis der Simulation ist in Abb. 5.12 dargestellt. Es zeigt sich, dass der komplette Bildinhalt aus der simulierten Beobachterposition heraus gesehen werden kann.

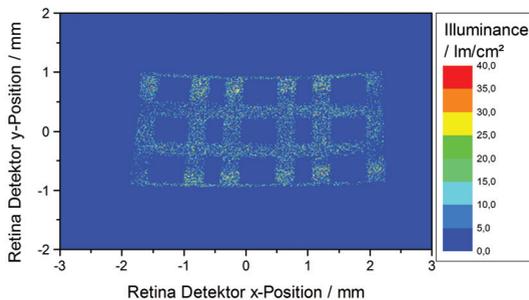


Abbildung 5.12: Dargestellt ist die Abbildung des Displays der Bildgebereinheit auf die Netzhaut des in der nichtsequentiellen Simulation integrierten Betrachterauges. Der komplette Bildinhalt ist aus der simulierten Position heraus sichtbar (vgl. Abb. 5.9).

5.2.3 AUFBAU UND CHARAKTERISIERUNG EINES DEMONSTRATORS

Das vorgestellte Konzept wurde in einem Labordemonstrator realisiert und messtechnisch charakterisiert. Um das Hinterleuchtungskonzept experimentell untersuchen und variieren zu können, wurde im Rahmen des Bosch Projekts „Autostereoskopisches HUD“ das in Abb. 5.13 gezeigte, mechanische Gehäuse konstruiert, das den modularen Aufbau der LCD-Hinterleuchtung erlaubt [93]. Als Abbildungsoptik wird die in Kap. 4.1 vorgestellte Testoptik eingesetzt.

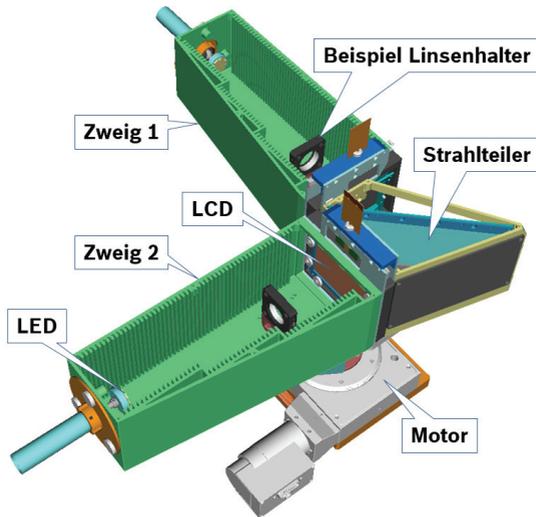


Abbildung 5.13: Mechanische Gehäuse zur Realisierung und experimentellen Untersuchung der simulierten Hinterleuchtungsansätze. Die mechanische Konstruktion fand im Rahmen des Bosch Projekts „Autostereoskopisches HUD“ statt [93].

Die Konstruktion sieht eine Realisierung des in Kap. 5.1 vorgestellten Strahlteilerkonzepts vor. Zwei LCDs werden mittels eines Wire Grid

Strahlteilers überlagert und im jeweiligen Zweig hinterleuchtet, um eine Eyebox mit dem entsprechenden Teilbild zu erzeugen. Der einzelne Hinterleuchtungs-zweig besteht aus einer mit Einschubfächern versehenen Box, innerhalb derer beliebig Blenden, Linsen und andere optische Elemente platziert werden können. Die verwendete LED ist auf einem verschiebbaren Zylinder mit Kugelgelenk befestigt und dadurch in der Position ausrichtbar.

Die Nachführung des Systems ist als Komplett-nachführung der gesamten PGU realisiert. Dazu ist die gesamte Vorrichtung auf einem Rotationsmotor befestigt, dessen Drehachse durch das Zentrum von einer der beiden LCDs verläuft, die als Displayfläche für die Abbildungsoptik des HUDs dient. Bei einer Drehung um diese Achse ändert sich die Abstrahlrichtung des Displays relativ zur Abbildungsoptik, wodurch die Eyeboxen horizontal bewegt werden können. Durch die Drehung des Displays bewegt sich dieses aus der Abbildungsebene heraus, wodurch die virtuelle Leinwand ebenfalls leicht um die vertikale Achse rotiert. Für die Nachführung innerhalb der Gesamteyebox ist eine Drehung von etwa $\pm 3^\circ$ erforderlich.

In diesem Winkelbereich kann der Effekt toleriert werden. Die Abbildungsoptik ist dabei ausreichend tolerant, um eine hohe Abbildungsqualität zu gewährleisten (vgl. Kap. 4.1). Alternativ können die beiden Zweige mit jeweils einem eigenen Motor bewegt werden. Die Drehachse liegt dann jeweils im hinterleuchteten Display, das sich allerdings selbst nicht mit dreht. Die Strahlteilerbox mit den LCDs bleibt dann feststehend. In diesem Nachführkonzept werden die Hinterleuchtungen des Displays nachgeführt und die Eyeboxen können damit unabhängig voneinander bewegt werden.

Das Prinzip der im Demonstrator realisierten Hinterleuchtung ist in Abb. 5.14 dargestellt. Die Streufläche nach den Mikrolinsenarrays wurde nach experimenteller Untersuchung eingebracht, um schwache, noch im virtuellen Bild wahrnehmbare und durch das

Mikrolinsenraaster verursachte Strukturen zu eliminieren. Sie streut das Licht in 5° in der Horizontalen und 20° in der Vertikalen. Durch den dadurch vergrößerten Streuwinkel nach den Mikrolinsen fangen die nachfolgenden Optiken nicht mehr das gesamte Licht auf und die Systemeffizienz sinkt.

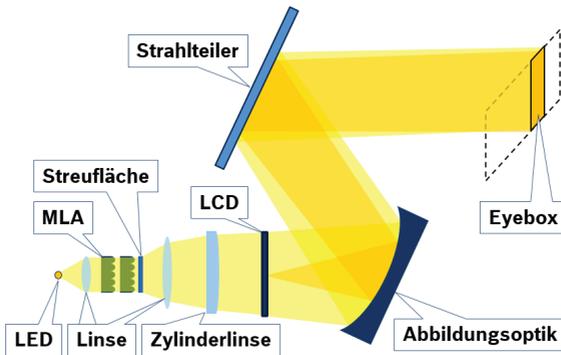


Abbildung 5.14: Umgesetztes Konzept zum Aufbau eines LCD-basierten Labordemonstrators.

In Tab. 5.1 sind einige Ergebnisse der messtechnischen Charakterisierung des Demonstrators aufgeführt.

Das Übersprechen von 0,64 % kann je nach eingestellter Bildhelligkeit als störend empfunden werden, da die Toleranzgrenze des Übersprechens abhängig vom Umgebungslicht und vom Kontrast zur Fahrscene ist. Bei Einsatz im Straßenverkehr muss der Bildinhalt des HUDs gedimmt werden, damit die Straßenszene hinter den dargestellten Symbolen wahrnehmbar bleibt.

Im realisierten Demonstrator ist ein wesentlicher Anteil des Übersprechens auf eine Beugung des Lichts an den RGB-Subpixeln der LCD-Pixelstruktur zurückzuführen. Das Pixelgitter ist bei der

Labordemonstrator mit MLA-basierter LCD-Hinterleuchtung		
VSD	3,52 m	Virtuelle Leinwanddistanz im Zentrum
EB	20,1mm	Breite der Einzeleyebox (FWHM)
Leuchtdichte	8880 cd/m ²	Erreichte mittlere Leuchtdichte
Granulation	1,4 %	Granulation im weißen Vollbild
Homogenität	1,44	Homogenität des virtuellen Bildes
Kontrast	7695 : 1	Schwarz-Weiß-Kontrast
4 % Kontrast i	1110 : 1	4 % Kontrast innen
4 % Kontrast a	3975 : 1	4 % Kontrast außen
Übersprechen	0,64 %	Übersprechen der Teilbilder

Tabelle 5.1: Messtechnisch ermittelte Werte zu einem auf zwei LCDs basierenden Labordemonstrator. Das dazugehörige optische Design findet sich in Abb. 4.1.

verwendeten LCD in horizontaler Richtung durch die Subpixel (ca. $29 \mu\text{m}$) sehr viel enger als in der vertikalen Richtung (ca. $86 \mu\text{m}$). Das die LCD hinterleuchtende Licht wird daher vor allem in horizontaler Richtung gebeugt und erzeugt nach Farben aufgespaltene Eyeboxen erster Ordnung, die in der Nähe der Eyebox für das andere Auge liegen.

Eine Lösung besteht darin, die Pixelstruktur der LCD um 90° zu drehen, wodurch die hauptsächliche Beugung in vertikaler Richtung stattfindet. Im Laborversuch konnte das Übersprechen damit auf 0,055 % reduziert werden.

Da bei gedrehter LCD aufgrund ihrer Abmessungen nur ein geringeres Blickfeld des virtuellen Bildes in horizontaler Richtung genutzt werden kann, wurde in folgenden prototypischen Aufbauten und Demonstratoren unter Inkaufnahme des erhöhten Übersprechens weiterhin die horizontal ausgerichtete Subpixelstruktur verwendet.

5.2.4 MECHANISCHES NACHFÜHRKONZEPT

Das mechanische Nachführkonzept des Demonstrators aus Kap. 5.2.3 wurde in einer im Rahmen dieser Arbeit betreuten Bachelorarbeit untersucht [94].

Darin wurde ein Head-Tracking System des *Fraunhofer Heinrich Hertz* Instituts (HHI) mit einem System der Firma *Seeing Machines* verglichen, das von der Firma *BMW* modifiziert und im Rahmen des öffentlich geförderten Projekts *Picolo* zur Verfügung gestellt wurde. Ein qualitativer Vergleich der beiden Systeme findet sich in Tab. 5.2.

	HHI-Head-Tracker	Seeing Machines Head-Tracker
Anzahl Kameras	2	2
Stereo-Betrieb	ja	nein (best of two)
Augenposition einzeln	ja	nein
Gesichtserkennungszeit	1,2 s	5,7 s
Robustheit	ausreichend	sehr robust bei Bewegungen
Basisabstand Kameras	fester Abstand	frei einstellbar

Tabelle 5.2: Vergleich zweier Head-Tracking Systeme vom *Fraunhofer HHI* und von der Firma *Seeing Machines*. Eine Messung der Gesichtserkennungszeit wurde durchgeführt in [95] und bezieht sich auf Nutzer, die keine Brille tragen.

Das HHI-Head-Tracking System liefert die Augenpositionen für beide Augen und basiert auf einem Stereobetrieb der beiden Kameras. Dadurch wird es ermöglicht, die Entfernung des Kopfes, sowie den Augenabstand zu jedem Zeitpunkt zu bestimmen. Bei einer Drehung des Kopfes wie beispielsweise bei einem Blick in den Seitenspiegel, verringert sich der Abstand der Augen in x-Richtung. Dieser Anwendungsfall kann dadurch erkannt und berücksichtigt werden.

Das System von Seeing Machines nutzt ebenfalls zwei Kameras und gewichtet die in beiden Kamerabildern bestimmte Augenposition gegeneinander, um die Kopfposition zu bestimmen. Bei der Gewichtung wird die Gesichtserkennung in jedem Kamerabild bewertet und ein entsprechendes Verhältnis bestimmt.

Im Demonstrator wurde aufgrund der schnellen Gesichtserkennung ohne zusätzliche, infrarote Beleuchtung und aufgrund der übergebenen Einzelpositionen der Augen der HHI-Head-Tracker eingesetzt. Für die Motorik der Nachführung im PGU-Aufbau nach Abb. 5.13 wurde ein Drehtisch des Typs *M-0.61PD* der Firma *Physical Instruments* verwendet, der sich durch hohe Präzision und mechanische Belastbarkeit auszeichnet [94].

Die Dimensionen der Gesamteyebox und der darin realisierten, kleinen Eyeboxen sind in Abb. 5.15 dargestellt. Da die vertikale Richtung der Eyeboxen nicht nachgeführt wird, ist die vertikale Ausdehnung mit 60 mm auf einen weiteren Bereich ausgelegt. Die einzelnen Eyeboxen befinden sich in einem Abstand von 65 mm zueinander und besitzen eine Halbwertsbreite von etwa 20 mm.

Bei einer Kopfbewegung werden die Eyeboxen nachgeführt wie es in Abb. 5.16 schematisch dargestellt ist. Im ersten Schritt befinden sich dabei die Augen innerhalb der schmalen Eyeboxen. Es wird dabei ein Toleranzbereich definiert, innerhalb dessen sich das Auge bewegen darf, ohne dass die Nachführung aktiv wird (rot). Dadurch wird ein ständiges Zittern der Nachführung bei geringen Schwankungen in der bestimmten Augenposition vermieden.

Bewegt sich die Augenmitte aus dem Toleranzbereich heraus, so wird die Nachführung aktiv (Schritt 2). Die Eyeboxen werden dann durch die Motorbewegung auf die Augenpositionen geführt und es wird dort ein neuer Toleranzbereich für die Augenbewegung definiert

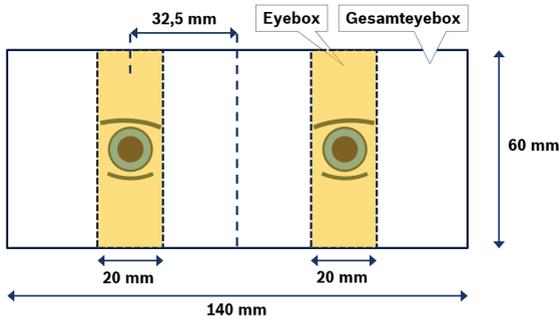


Abbildung 5.15: Schema der Gesamteyebox des HUD-Systems. Die Augen mit einem angenommenen Augenabstand von 65 mm befinden sich in den Zentren der beiden jeweils 20 mm breiten, kleinen Eyeboxen.

(Schritt 3). Der Fahrweg des Motors ist durch den Toleranzbereich nach unten hin limitiert. Es existiert eine Mindestschrittlänge beim Verfahren auf eine andere Position. Bei schneller Erfassung der Head-Tracking Daten in Relation zur Kopfbewegung führt der Motor in mehreren Schritten in jeweils etwa der Mindestschrittlänge nach. Daher werden die PID-Parameter der Motorregelung auf diese Schrittweite angepasst, um ein optimales Einschwingverhalten zu realisieren [94].

Zur Bestimmung der mechanischen Latenzzeit wurde im C#-basierten Ansteuerprogramm eine Funktion integriert, durch die die aktuelle Motorposition aus dem den Motor ansteuernden Controller ausgelesen und mit der Sollposition verglichen wird. Die mechanische Latenzzeit wurde im System bei Bewegungen des Kopfes von 0,1 m/s in horizontaler Richtung zu 42 ms bestimmt, was einem Nachlaufen der Eyebox um 4,2 mm entspricht. Bei Geschwindigkeiten von 0,2 m/s betrug die Latenzzeit 47 ms, wodurch die Eyebox 9,4 mm

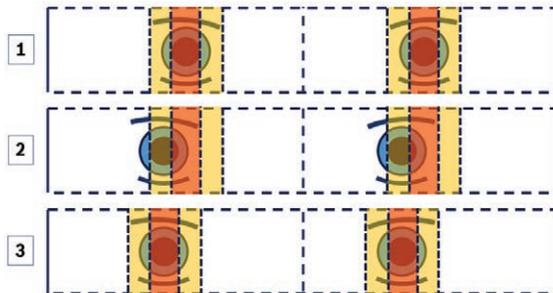


Abbildung 5.16: Ablauf der Nachführung der kleinen Eyeboxen. Schritt 1: Die Augen befinden sich in Ausgangsposition im Zentrum der Eyeboxen. Schritt 2: Die Augen bewegen sich um mehr als einen tolerierten Bereich (rot) aus dem Zentrum der kleinen Eyeboxen heraus. Ab diesem Punkt wird die Nachführung aktiv. Schritt 3: Die Nachführung bewegt die Eyeboxen auf die Augenpositionen und definiert dort erneut einen Toleranzbereich. Eigene Darstellung in Anlehnung an [94].

nachläuft [94]. Kopfgeschwindigkeiten von über $0,2 \text{ m/s}$ treten nach Untersuchungen im Bosch Projekt *Autostereoskopisches HUD* in der Regel nicht auf und können vernachlässigt werden.

Da die realen Eyeboxen zum Rand hin dunkler werden, kann bei schnellen Kopfbewegungen ein Flackern der Bildhelligkeit bedingt durch die schrittweise mechanische Nachführung auftreten. Um das zu vermeiden, kann das System durch die Wahl des Toleranzbereiches der Nachführung und die Eyeboxbreite angepasst werden. Eine Top-Hat-Formung der Eyeboxen, wie beispielsweise durch holographische Elemente, kann das Flackern ebenfalls verringern (vgl. Kap. 4.5). Um das System für Nutzer mit verschiedenem Augenabstand erfahrbar zu machen, kann die Eyebox verbreitert werden. Die Augen befinden sich dann in Nullposition nicht zwingend im Zentrum der Eyeboxen.

5.2.5 SINGLE LCD VARIANTE

Prinzipiell kann das Strahlteilerkonzept auch mit einer einzelnen LCD-Zelle als Bildgeber angewandt werden. Eine genauere Beschreibung dieser Konzeptvariante findet sich im Anhang in Kap. A.3.1 auf S. 231. Dabei wird die LCD-Zelle selbst durch einen senkrecht auf der Displayfläche stehenden Strahlteiler in zwei Bereiche unterteilt, von denen einer mit dem anderen durch den Strahlteiler virtuell überlagert wird. Ein entsprechender Aufbau wurde dazu mit Hilfe der in Kap. 4.1 vorgestellten Testoptik aufgebaut und charakterisiert.

Auf Basis der Untersuchungen wurde ein Patententwurf ausgearbeitet und beim Deutschen Patentamt eingereicht [38].

5.3 FRONTSCHIEBEN-PROTOTYP

In diesem Abschnitt wird ein anwendungsorientierter Prototyp mit einer Serienfrontscheibe und einem integrierten Fahrersitz vorgestellt, der auf Basis der Konzeptuntersuchungen aus Kap. 5.2 entwickelt und aufgebaut wurde. Es wurde dazu ein LCD-basiertes Strahlteilerkonzept in einem Sitzkistenaufbau umgesetzt. Teile der in diesem Abschnitt vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen dieser Arbeit veröffentlicht [30]. Der Prototyp wurde außerhalb dieser Arbeit ebenfalls für Untersuchungen der 3D Wahrnehmung im anwendungsnahen System genutzt [96].

5.3.1 OPTISCHES DESIGN

Das im Prototypen realisierte Hinterleuchtungskonzept ist in Abb. 5.17 dargestellt. Die Abbildungsoptik ist darin vereinfacht als Vergrößerungslinse dargestellt und es wird beispielhaft eine Eyebow mit einer

einzelnen LCD-Zelle realisiert. Als Lichtquelle kommt eine weiße LED des Typs *Golden Dragon* der Firma *Osram* zum Einsatz, deren Licht kollimiert und über zwei Mikrolinsenarrays homogenisiert wird.

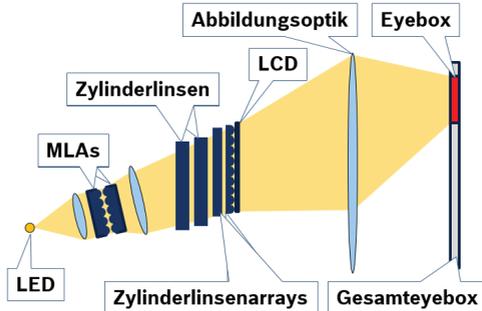


Abbildung 5.17: Hinterleuchtungsprinzip des Frontscheiben-Prototyps. Das Licht einer LED wird dabei kollimiert und über eine MLA-Stufe homogenisiert. Die notwendige Abstrahlrichtung am Display wird durch Zylinderlinsen angepasst. Zylindrische Linsenarrays hinter der LCD-Zelle erzeugen die notwendigen Abstrahlkegel, um die Breite und Höhe der gewünschten Eyebox auszuleuchten.

Über eine nachfolgende Linse und zwei weitere, zylindrische Linsen werden die notwendigen Abstrahlrichtungen am Display erreicht. Hinter den LCD-Zellen werden die beiden in Kap. 4.2 vorgestellten, zylindrischen Mikrolinsenarrays eingesetzt. Diese weiten die Lichtbündel derart auf, dass die Strahlkegel am Display die notwendige Abstrahlbreite besitzen, um über die Abbildungsoptik schmale Eyeboxen am Ort der Gesamteyebbox zu formen.

Das Hinterleuchtungskonzept greift nur auf Katalogoptiken und die aus der in Kap. 4.2 vorgestellten Konzeptuntersuchung verfügbaren Komponenten zurück. Das in Kap. 5.2.2 vorgestellte Prinzip, bei dem die Aperturen der Hinterleuchtungsoptiken bereits die notwendigen Strahlkegel ohne Einsatz aufweitender Elemente direkt hinter der

LCD-Zelle formen, wird im vorgestellten Frontscheiben-Prototyp nicht angewendet, um auf spezifisch angefertigte Komponenten in der Hinterleuchtung verzichten zu können.

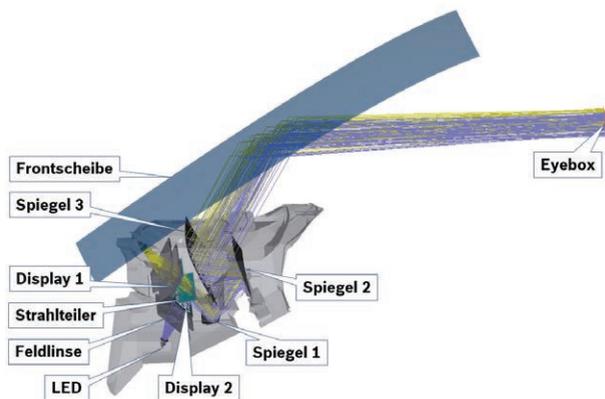


Abbildung 5.18: Optisches Design des Frontscheiben-Prototyps mit Bildgebereinheit in nichtsequentieller Simulation. Das Design ist an einen Bauraum angepasst, der aus dem Bosch Projekt „Autostereoskopisches HUD“ stammt [97].

In Abb. 5.18 ist das erstellte Design in einer nichtsequentiellen Simulation zusammen mit den Elementen der Bildgebereinheit dargestellt. Darin wird das Strahlteilerkonzept aus Kap. 5.1 realisiert. Das Design ist angepasst, um in einen im Bosch Projekt „Autostereoskopisches HUD“ festgelegten Bauraum integriert werden zu können. Dadurch eignet sich das optische Design prinzipiell auch zur Umsetzung in einem Fahrzeugdemonstrator. In der vertikalen Richtung wird das Bild innerhalb der Abbildungsoptik zwischenfokussiert, um ein schlankes Strahlenbündel zu erreichen, dass in den Bauraum gefaltet werden kann. In der horizontalen Breite erfolgt kein Zwischenfokus.

Einige Kenngrößen des optischen Designs finden sich in Tab. 5.3. Die hohe Anzahl an Freiformelementen in der Abbildungsoptik erlaubt eine Kompensation der durch die Frontscheibe verursachten Verzerrungen und führt zu einer sehr guten Abbildungsqualität mit geringen Spotgrößen, geringer Wölbung des virtuellen Bildes, geringer Verzerrung und niedrigem Astigmatismus. Gleichzeitig wird das System empfindlicher gegenüber Lagetoleranzen der Elemente. Eine entsprechende Untersuchung findet sich in Kap. 2.2.

Parameter	Wert	Beschreibung
Scheibe	gekrümmt	Serienscheibe mit Keilwinkel
AS	3	Anzahl Freiformspiegelemente
VSD	5 m	Virtuelle Leinwanddistanz
σ_{VSD}	0,3 m	Standardabweichung Leinwanddistanz
FOV	$10^\circ \times 3,5^\circ$	Field of View (Blickfeld) in VSD
EB	140 mm \times 50 mm	Gesamteyebboxgröße
Spot	20 μ m	Durchschn. Spotgröße
Res	652 px/ $^\circ$	Übertragene Auflösung
AST	0,2 m	Durchschn. Astigmatismus
Display	3,1", 5 : 3	Displaygröße (eine LCD-Zelle)

Tabelle 5.3: Parameter des Frontscheiben-Prototyps nach dem Design aus Abb. 5.18.

In Abb. 5.19 ist der angenäherte Bauraum des Gesamtsystems dargestellt und in die Anteile der Bildgebereinheit und der Abbildungsoptik untergliedert.

Der relativ hohe, von der PGU eingenommene Anteil rührt vom Strahlteilerkonzept mit einzelnen Hinterleuchtungsästen für die beiden LCD-Zellen her. Nicht in diesem Bauraum enthalten sind der

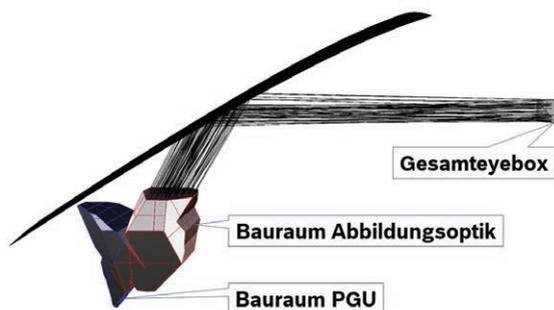


Abbildung 5.19: Angefertigter Bauraum für das Design des Frontscheiben-Prototyps aus Abb. 5.18. Nicht enthalten ist ein Vorhalt für die Drehung der gesamten PGU bei entsprechender Nachführung, sowie das Volumen eines Nachführmotors.

Vorhalt für eine Nachführung durch Drehung der gesamten PGU, sowie der zur Nachführung notwendige Motor.

Die virtuelle Leinwanddistanz wurde auf einen Abstand von 5 m designt, um für die 3D Darstellung eine Komfortzone hin zu größeren Bildabständen zu erreichen. Das Auge muss in diesem Fall weniger zwischen der Straßenszene und dem virtuellen Bild umfokussieren, als es beispielsweise bei der Testoptik aus Kap. 4.1 mit einer Leinwanddistanz von 3 m der Fall ist.

In Abb. 5.20 ist die mit Hilfe eines Matlab-Programms des Bosch Geschäftsbereichs *Car Multimedia* erstellte Analyse der virtuellen Leinwanddistanzen dargestellt. Die Distanzen werden aus unterschiedlichen Positionen innerhalb der Gesamteyebox mit einer Augenapertur von 8 mm simulativ bestimmt. Der linke Plot zeigt das Ergebnis aus einer zentralen Eyeboxposition heraus. Im rechten Bild befindet sich die Beobachterposition in der linken oberen Ecke als worst case der Leinwandwölbung.

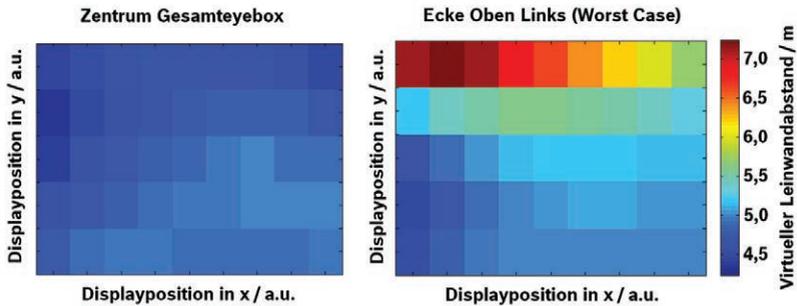


Abbildung 5.20: Bestimmung der virtuellen Leinwanddistanz für unterschiedliche Displaybereiche im Design des Frontscheiben-Prototyps. Die Auswertung des Designs erfolgte mit Hilfe eines Matlab-Programms des Bosch Geschäftsbereiches *Car Multimedia* [98].

Für den späteren Betrieb des HUDs muss sichergestellt werden, dass unter realen Fahrbedingungen keine den Fahrer blendenden Reflexionen durch einkoppelnde Sonnenstrahlen im optischen System auftreten. Dazu wird eine nichtsequentielle Sonnenlichtsimulation durchgeführt, wie sie in Abb. 5.21 dargestellt ist. Eine ausgedehnte Lichtquelle in Form der Gesamteyebox strahlt darin in Richtung der Frontscheibe ab, wo die Strahlen reflektiert werden und ins optische System des HUDs gelangen. Spiegel, Strahlteiler und Displayflächen des Systems werden als reflektiv simuliert. Die eingebrachten Blenden schließen optische Pfade aus, die durch Gehäuse und Armaturenbrett im Fahrzeug ebenfalls ausgeschlossen werden können.

Die ins System eingebrachten Lichtstrahlen reflektieren mehrfach über beliebige optische Pfade. In der Simulation wird überprüft, ob Strahlen auftreten, die auf diese Weise einen Detektor erreichen, der als „Himmel“ über dem Fahrzeug schwebt. Gäbe es einen solchen Strahl, so ergäben sich bei einem Sonnenstand, durch den Licht aus der entsprechenden Richtung eingestrahlt würde, im rückwärtigen

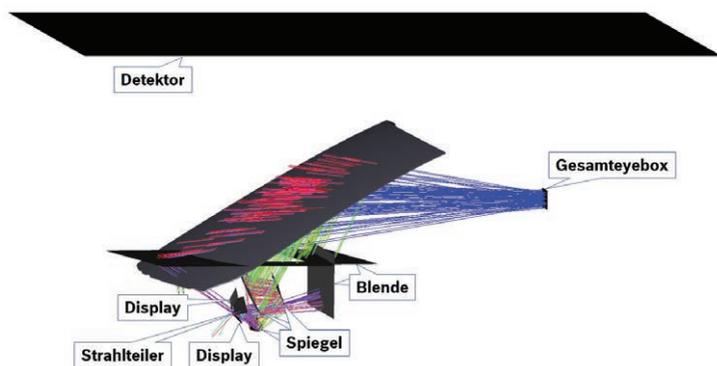


Abbildung 5.21: Simulation zur Überprüfung störender Sonnenlichtreflektionen im Design des Frontscheiben-Prototyps. Es werden dazu aus der Gesamteyebox Lichtstrahlen simuliert und in das HUD-System eingestrahlt. Dabei treten keine Reflektionen im System auf, die die Lichtstrahlen in Richtung des Detektors am Himmel leiten. Dadurch werden umgekehrt Lichtpfade ausgeschlossen, bei denen aus Richtung des Himmels den Fahrer blendende Reflektionen auftreten.

Strahlengang blendende Reflektionen, die in den Bereich der Gesamteyebox gelangen. Ziel der Simulation ist es daher, dass keiner der simulierten Lichtstrahlen den Detektor erreicht. Das optische Design muss daher gegebenenfalls in weiteren Iterationen angepasst werden, um solche optische Pfade zu vermeiden.

Da die Nachführung in diesem Konzept durch eine Drehung der PGU-Einheit um die Displayachse realisiert ist, wurde die Sonnenlichtuntersuchung auch bei Drehungen von $\pm 6^\circ$ durchgeführt.

5.3.2 AUFBAU EINES DEMONSTRATORS

Ein Querschnitt durch die mechanische Konstruktion zur Halterung der optischen Elemente findet sich in Abb. 5.22. Die Bildgebereinheit

ist auf einem Nachführmotor des Typs *M-0.61PD* der Firma *Physical Instruments* befestigt und kann um eine Achse gedreht werden, die durch das Zentrum der oberen Displayfläche führt. Die Drehachse steht senkrecht zur optischen Achse der Displayabstrahlung. Die Displayfläche ist geneigt und steht nicht senkrecht auf der optischen Achse. Die LEDs, sowie die nachfolgenden Linsen und Mikrolinsenarrays werden durch labortypische, optomechanische Halter gefasst, die über ein Stangensystem an einer Halterung befestigt sind. Zur Realisierung des Prototyps wurde die Herstellung der designten Freifromspiegel bei der Firma *Millpond* extern in Auftrag gegeben.

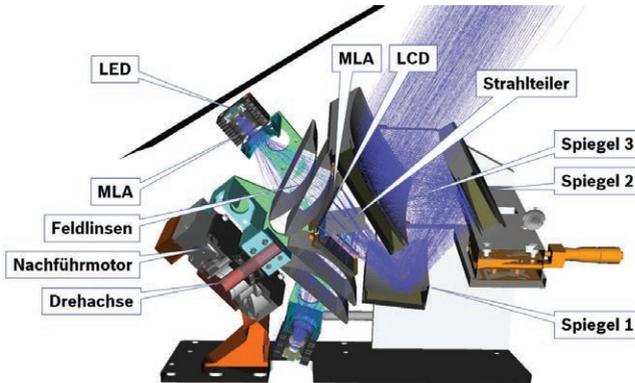


Abbildung 5.22: Mechanischer Aufbau des designten Frontscheiben-Prototyps. Die mechanische Konstruktion fand im Rahmen des Bosch Projekts „Autostereoskopisches HUD“ statt [93].

Abb. 5.23 zeigt den realen Aufbau des Gesamtsystems. Die Konstruktion wurde in eine im Rahmen des Bosch Projekts aufgebaute Sitzkiste integriert [99]. Für die Fahrerbeobachtung wurde das in Kap. 5.2.4 vorgestellte HHI-Head-Tracking System verwendet. Die Ansteuerung der mechanischen Nachführung erfolgt analog zu der ebenfalls in Kap. 5.2.4 beschriebenen Methodik des ersten LCD-Labordemonstrators.



Abbildung 5.23: Abbildung des realisierten Frontscheiben-Prototyps. Der Prototyp ist als Sitzkiste mit Fahrersitz und Serienfrontscheibe aufgebaut [30].

Das aufgebaute System des Frontscheiben-Prototyps wurde messtechnisch charakterisiert. Abb. 5.24 zeigt den messtechnisch bestimmten Eyeboxverlauf im realen System in einem Vergleich zu den simulativ gewonnenen Daten. Die Kurven beschreiben die vermessene, normierte Leuchtdichte auf einem in der Gesamteyebbox positionierten Schirm im Querprofil.

Die simulierten Kurven klingen zum Bereich der anderen Eyebox hin vollständig aus. Im realen Aufbau auftretende Effekte, wie beispielsweise ungewollte Lichtstreuung oder Beugungseffekte in der Pixelmatrix der LCD-Zelle, führen zu einer Verbreiterung der Kurven und zu einem Restlichtanteil im Bereich des jeweils anderen Auges, was ein Übersprechen der Teilbilder verursacht (vgl. Tab. 5.4, S. 144).

Abb. 5.25 zeigt die Aufnahme des virtuellen Bildes mit Hilfe einer Leuchtdichtekamera bei vollflächig weißem Bild. Die über die 9 Teilflächen berechnete Homogenität liegt bei 1,6. In einer nichtsequentiellen Simulation wurde dagegen mit Hilfe des integrierten Beobachterauges eine Homogenität von 1,9 bestimmt. Zusätzliche streuende Anteile im

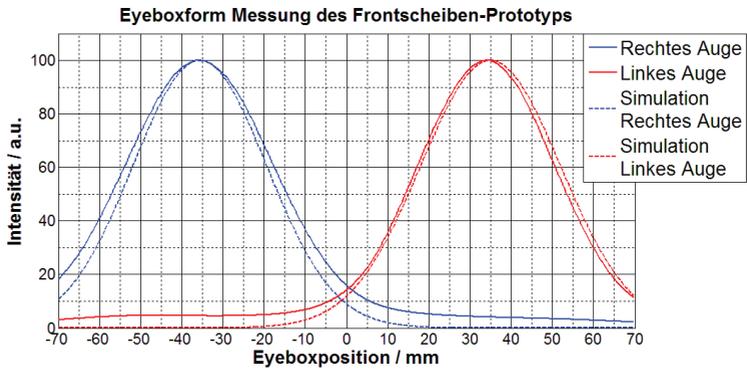


Abbildung 5.24: Vergleich der simulierten und vermessenen Eyeboxform als Querprofil durch die Gesamteyebbox. Die realen Messkurven zeigen aufgrund von Streu- und Beugungseffekten im System einen Restlichtanteil am Ort der jeweils anderen Eyebox, der ein Übersprechen erzeugt.

realen System wirken sich positiv auf die Homogenität des Bildes aus. Die erreichte mittlere Leuchtdichte im Bild beträgt 570 cd/m^2 bei Einsatz eines verhältnismäßig geringen LED-Lichtstroms von 100 lm pro LED. Prinzipiell können im autostereoskopischen Konzept sehr hohe Leuchtdichten realisiert werden, da das Licht des jeweiligen Teilbildes nur in einer schmalen Eyebox zur Verfügung gestellt werden muss. Die Hinterleuchtungsoptik des Frontscheiben-Prototyps ist allerdings nicht auf eine hohe Lichteffizienz optimiert. Ebenso geht ein hoher Lichtanteil durch die Strahlteilerlösung ohne zusätzliche Polarisationsanpassung der Displayabstrahlung verloren (vgl. Kap. 5.1).

Einen direkten Vergleich zwischen einem simulativen Bildinhalt und dem aufgenommenen virtuellen Bild findet sich in Abb. 5.26. Links dargestellt ist ein in der Simulation auf die Netzhaut des

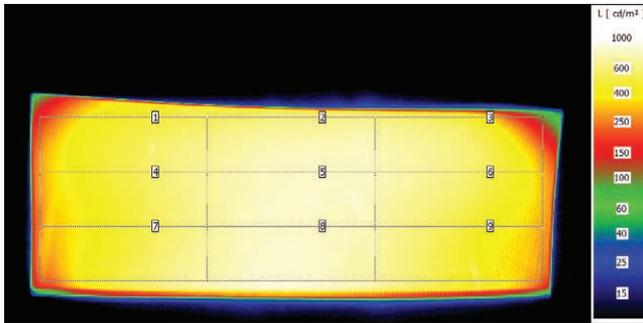


Abbildung 5.25: Leuchtdichte in logarithmischer Skala über 2 Dekaden im virtuellen Bild der rechten Eyebow bei Darstellung einer weißen Vollfläche. Das Verhältnis der hellsten und dunkelsten Teilfläche bestimmt die Homogenität zu 1,6.

Beobachterauges abgebildetes Testbild im Vergleich zur Aufnahme des virtuellen Bildes im Demonstrator rechts.

Die Verzerrung des real aufgenommenen Testbildes ist zu großem Teil auf die Montage der Frontscheibe zurückzuführen. Die Halterung der Frontscheibe mit wenigen Aufnahmepunkten (vgl. Abb. 5.23) führt zu mechanischen Spannungen, die zu Formabweichungen zum in der Simulation verwendeten CAD-Modell führen. Das manuelle Ausrichten und Fixieren der Scheibe lässt außerdem keine exakte Positionierung zu.

Eine Zusammenfassung einiger Messwerte des Frontscheiben-Prototyps findet sich in Tab. 5.4. Die tatsächlich gemessene Leinwanddistanz liegt mit 4,4 m unter den angestrebten 5 m des optischen Designs. Die Leinwanddistanz kann prinzipiell durch Variation der Distanz des Displays zum ersten Abbildungsspiegel korrigiert werden.

Im virtuellen Bild kann ein leichtes Durchscheinen einer durch die zylindrischen Mikrolinsenarrays hinter den LCD-Zellen verursachten

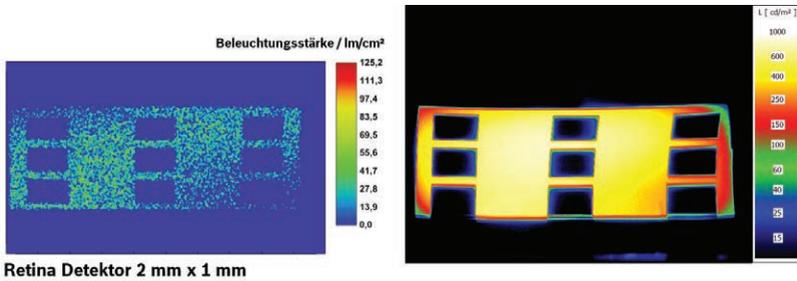


Abbildung 5.26: Vergleich der Homogenität in der Simulation (links) und im Aufbau (rechts) bei Darstellung eines Testbildes (vgl. Kap. 2.3.3).

Gitterstruktur wahrgenommen werden, die zu lokaler Inhomogenität und damit zu einer gewissen Granulation und einer Reduktion des Kontrastes bei hohen Linienpaarfrequenzen führt. Die Homogenität über die gesamte Displayfläche wurde zu 2,0 bestimmt und liegt damit über dem im Bosch Projekt „Autostereoskopisches HUD“ definierten Wert von 1,3 des Lastenhefts [43]. Subjektiv wird der Helligkeitsabfall am Bildrand nicht als störend empfunden und kann zudem durch die Graustufen des Bildinhalts angeglichen werden.

Die erreichte Helligkeit des Bildes von nur 570 cd/m^2 liegt deutlich unterhalb der im Lastenheft geforderten 10.000 cd/m^2 [43]. Der Wert ergibt sich aus einer Mittelung der Leuchtdichte aus linkem und rechtem Teilbild, wobei die linke Eyebox mit 94 lm (400 mA) und die rechte Eyebox mit 191 lm (1 A) hinterleuchtet wurde [100]. Die Effizienz des Systems kann durch Optimierung der verwendeten Optiken erhöht werden. Es wird außerdem die Verwendung einer stärkeren Lichtquelle empfohlen.

Messungen Frontscheiben-Prototyp		
VSD	4,4 m	Virt. Leinwanddistanz im Zentrum
EB	41 mm	Breite der Einzeleyebox (FWHM)
Leuchtdichte	570 cd/m ²	Erreichte mittlere Leuchtdichte
Granulation	1,85 %	Granulation im weißen Vollbild
Homogenität	2,0	Homogenität des virtuellen Bildes
Kontrast	2144 : 1	Schwarz-Weiß-Kontrast
4 % Kontrast i	256 : 1	4 % Kontrast innen
4 % Kontrast a	1032 : 1	4 % Kontrast außen
DB-Kontrast	2,7 : 1	Doppelbildkontrast
Übersprechen	3,6 %	Übersprechen der Teilbilder
Gesamteyebox	> 140 mm × 50 mm	Abmessung der Gesamteyebox
Auflösung	408 px × 201 px	Auflösung im virt. Bild (MTF 30%)

Tabelle 5.4: Übersicht über einige Messwerte des Frontscheiben-Prototyps. Die Werte stellen jeweils die Mittelwerte aus rechter und linker Eyeboxposition dar. Die Zieleyeboxbreite betrug 40 mm. Das dazugehörige optische Design findet sich in Abb. 5.18.

5.4 FAHRZEUGDEMONSTRATOR

Als Grundlage zur praktischen Untersuchung des autostereoskopischen Ansatzes wird in diesem Abschnitt das Design und die Realisierung eines Fahrzeugdemonstrators vorgestellt. Das bereits aus Kap. 5.3 bekannte Prinzip wird dabei um eine neue Form der mechanischen Nachführung erweitert, bei der nur geringe Massen bewegt werden müssen und die dadurch ins Fahrzeug eingebaut werden kann.

Für das entwickelte Systemkonzept wurde ein Patententwurf beim Deutschen Patentamt eingereicht [37]. Der Fahrzeugdemonstrator diente im öffentlich geförderten Projekt *Piccolo* als Grundlage für eine

Nutzerstudie, bei der in Zusammenarbeit mit BMW Untersuchungen bezüglich der Wahrnehmung im autostereoskopischen HUD durchgeführt wurden.

5.4.1 OPTISCHES DESIGN

Das Hinterleuchtungskonzept des Fahrzeugdemonstrators ist in Abb. 5.27 schematisch für die Erzeugung einer einzelnen Eyebox dargestellt und wurde in [30] veröffentlicht. Aus dem kollimierten Strahlbündel einer LED Lichtquelle wird mittels einer Blende ein Bereich herausgeschnitten, der ein speziell an das System angepasstes Mikrolinsenarray ausleuchtet. Die einzelnen Mikrolinsen spalten das Licht in mehrere Kanäle und weiten es auf. Die Kanäle werden durch die nachfolgende Linse auf der LCD-Fläche überlagert und leuchten sie gleichmäßig aus. Die Blendenstellung legt die Beleuchtungsrichtung fest, wodurch sich das Licht nach der Abbildungsoptik des HUD-Systems am Ort des Beobachterauges in einer schmalen Eyebox sammelt.

Ein einzelner Pixel der LCD-Zelle wird bedingt durch die Aperturgröße der Blende aus einem gewissen Winkelbereich heraus beleuchtet. Mit der Breite der Blendenöffnung lässt sich die Breite der Abstrahlkegel an der Displayfläche und damit die Eyeboxbreite definieren. Wird die Blende bewegt, so verschiebt sich der beleuchtete Bereich auf dem MLA und die LCD-Zelle wird aus einer anderen Richtung hinterleuchtet, wodurch sich die Eyebox verschiebt. Zur Nachführung der Eyebox muss damit nur die Blende bewegt werden, die im Vergleich zum im Frontscheiben-Prototyp aus Kap. 5.3 angewandten Nachführsystem nur eine geringe, nachzuführende träge Masse darstellt. Mechanische Latenzzeiten werden auf diese Weise minimiert.

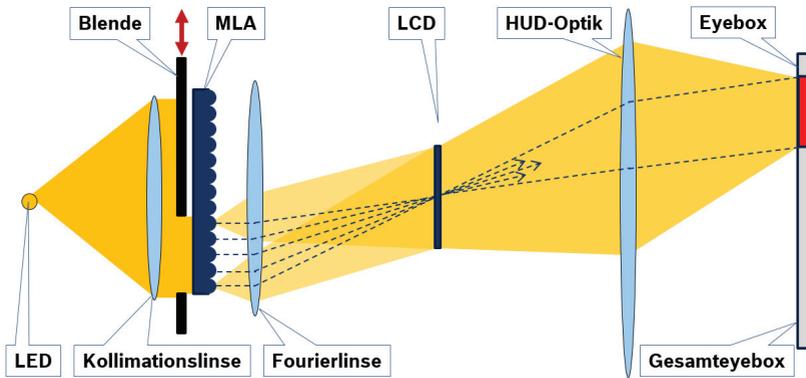


Abbildung 5.27: Hinterleuchtungsprinzip des Fahrzeugdemonstrators. Das Licht einer LED wird kollimiert und beleuchtet ein homogenisierendes Mikrolinsenarray. Je nach Stellung der Blende vor dem Array werden unterschiedliche Bereiche beleuchtet, wodurch die LCD-Zelle aus unterschiedlichen Richtungen durchstrahlt wird. Die Beleuchtung erzeugt Lichtkegel an den Pixeln des Displays, die sich in der Gesamt-eyebox zu einer schmalen Eyebox aufweiten und dort überlagern (Bsp. gestrichelte Linien).

Die Realisierung der zweiten Eyebox mit einem weiteren Teilbild erfolgt auch im Fahrzeugdemonstrator nach dem Strahlteilerprinzip aus Kap. 5.1 durch die virtuelle Überlagerung einer zweiten LCD-Zelle. Beide LCD-Zellen werden nach gleichem Prinzip hinterleuchtet, wobei die beiden Blenden der Hinterleuchtung unabhängig voneinander ansteuerbar sind. Dadurch wird es ermöglicht, den Abstand der beiden Eyeboxen zueinander an den Augenabstand des Nutzers anzupassen.

Abb. 5.28 zeigt eine Simulation des vollständigen Systems. Im Designprozess wurde dabei auf die in Kap. 2 vorgestellten Simulationsmethoden zurückgegriffen. Das System ist an strenge Bauraumbeschränkungen angepasst, um ins Fahrzeug integriert werden zu

können und realisiert die Abbildung über zwei Freiformspiegel. Zusätzlich zum Hinterleuchtungsprinzip aus Abb. 5.27 sorgt jeweils eine kreuzzyindrische Feldlinse hinter der LCD-Zelle für die Anpassung der Abstrahlrichtungen der Displayfläche an die Erfordernisse der Abbildungsoptik.

Der Combiner ist gegenüber der Frontscheibe zusätzlich geneigt, um sicherzustellen, dass aus dem HUD-System stammendes Licht über die Reflektion an der Frontscheibe nicht in den Bereich der Gesamteyebbox gelangen kann. Das System vermeidet außerdem blendende Lichtpfade, bei denen Sonnenlicht in das HUD-System eingestrahlt wird und über mehrfache Reflektion in die Gesamteyebbox gelangt. Die entsprechende Simulation erfolgte analog zum in Kap. 5.3.1 beschriebenen Verfahren im Designprozess des Frontscheiben-Prototyps.

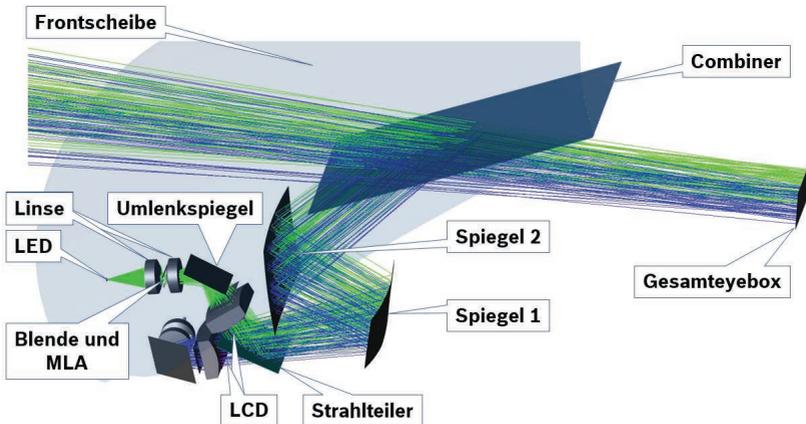


Abbildung 5.28: Optisches Design des Fahrzeugdemonstrators mit Bildgebereinheit in nichtsequentieller Simulation. Das Design ist an räumliche Randbedingungen angepasst, um ins Fahrzeug integriert werden zu können und basiert auf einem LCD-Strahlteilerkonzept (vgl. Kap. 5.1).

Zur Anpassung an den zur Verfügung stehenden Bauraum wurden die Hinterleuchtungsarme der Bildgebereinheit über einen Umlenkspiegel umgeleitet und insgesamt auf eine geringe Tiefe hin optimiert, um den notwendigen Bauraum zu reduzieren. In Abb. 5.29 ist der in einem CAD-Programm angefertigte Bauraum des Systems dargestellt. Die beiden Arme der PGU nehmen darin gegenüber der PGU des Frontscheiben-Prototyps ein deutlich verringertes Volumen ein (vgl. 5.3.2).

Die Abbildungsoptik selbst hat sich dagegen im Vergleich zum im Design des Frontscheiben-Prototyps bestimmten Bauraum vergrößert, trotz dass die Anzahl der verwendeten Freiformspiegel sich verringert hat. Das optische Design wurde im Fahrzeugdemonstrator ohne Zwischenfokus realisiert, wodurch das Strahlbündel des gesamten Nutzlichts große Volumina einnimmt. Durch den Verzicht auf den Zwischenfokus wird allerdings eine divergente Abstrahlcharakteristik des Strahlbündels an der LCD-Zelle in horizontaler und vertikaler Richtung gewährleistet. Die divergente Charakteristik reduziert die notwendige Brechkraft der hinter den LCD-Zellen befindlichen Feldlinsen gegenüber den Linsen des Frontscheiben-Prototyps und verringert die notwendige Bauraumtiefe der Hinterleuchtungsoptik. Nicht im Bauraum enthalten sind die zur Nachführung der Blenden notwendigen Motoren.

Bei einer Einspiegelung des virtuellen Bildes über die Frontscheibe wird das Doppelbild konventioneller Weise durch eine in die Frontscheibe eingebrachte Keilfolie mit dem eigentlich genutzten Bild überlagert. Der notwendige Keilwinkel ist abhängig von der virtuellen Leinwanddistanz und ist bei aktuell in der Serie befindlichen Systemen meist auf kurze Distanzen ausgelegt (vgl. Kap. 5.5.2).

Um im Fahrzeugdemonstrator auf eine speziell angepasste Frontscheibe verzichten zu können, wurde eine Combinerlösung verfolgt, bei

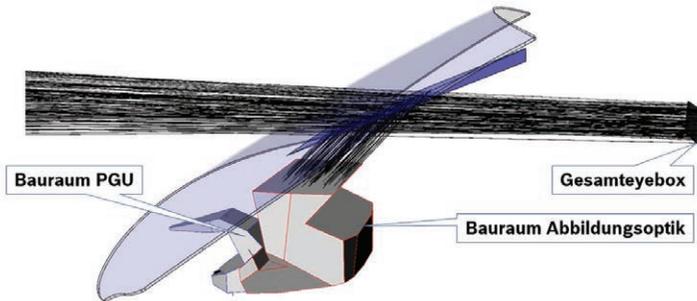


Abbildung 5.29: Gefitteter Bauraum für das optische Design des Fahrzeugdemonstrators aus Abb. 5.28.

der das virtuelle Bild über einen planen Strahlteiler abgebildet wird. Die Größe des Strahlteilers deckt einen weiten Bereich des Fahrersichtfeldes ab. Er besitzt eine Innenverspiegelung im VIS-Bereich von 30 % und eine breitbandig entspiegelte Außenseite. Die Doppelbildreduktion erfolgt durch diese beiden Beschichtungen. Eine Überlagerung von Doppelbild und Nutzbild findet nicht statt.

Die Integration des HUD-Systems macht eine transparente Abdeckung des Systems erforderlich, um es vor Schmutz und Zugriff von außen zu schützen. Die Form der Abdeckung ist dabei derart ausgelegt, dass keine blendenden Reflektionen auf der Oberfläche entstehen.

Das Prinzip zur simulativen Auslegung ist in Abb. 5.30 veranschaulicht. Aus dem Bereich des Nutzers kommende Strahlen werden über die Reflektion auf der Abdeckung in eine Lichtfalle geleitet. Der Fahrer schaut über die Reflektion an der Frontscheibe auf diese mattschwarze Fläche. Ist sichergestellt, dass alle aus der Gesamteyebox stammenden Strahlen in die Lichtfalle geleitet werden, so existieren im umgekehrten Strahlengang keine Sonnenstrahlen, die über Reflektionen an der Abdeckung und der Frontscheibe zum Fahrerauge gelangen.

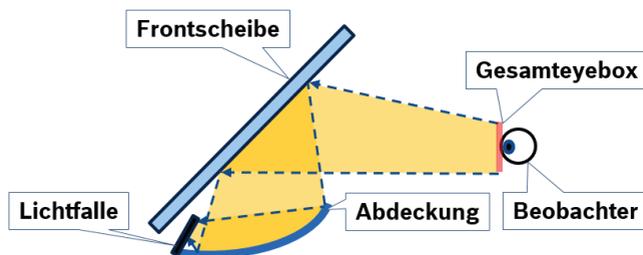


Abbildung 5.30: Prinzip zur Auslegung einer HUD-Abdeckung (Glare Trap), die blendende Oberflächenreflektionen vermeidet. Aus dem Bereich der Gesamteyebox ausgehende Strahlen werden über die Spiegelung auf der Oberfläche der Abdeckung in die Lichtfalle gelenkt. Der Betrachter schaut indirekt auf die Lichtfalle. Damit sind im umgekehrten Strahlengang blendende Sonnenstrahlen ausgeschlossen.

Das optische Design des Fahrzeugdemonstrators ist als eine Combinerlösung realisiert, bei der der Combiner und die Frontscheibe in unterschiedlichen Winkeln stehen, sodass die Reflektion der HUD-Strahlen an der Frontscheibe nicht in den Bereich der Gesamteyebox gelangt. Die unterschiedlichen Winkel der beiden Scheiben führen dazu, dass bei der simulativen Auslegung der Abdeckung das aus der Gesamteyebox heraus strahlende Licht jeweils auf unterschiedliche Bereiche der Lichtfalle trifft, die dadurch größer dimensioniert werden muss. Abb. 5.31 zeigt die entworfene Abdeckung (Glare Trap) für den Fahrzeugdemonstrator.

Diese wird im realen Aufbau mit einer transparenten Folie realisiert, die eine auf den Winkel des im optischen Design simulierten Zentralstrahls angepasste Breitbandentspiegelung besitzt.

Eine Übersicht über die optischen Parameter des ausgelegten Designs findet sich in Tab. 5.5. Das abgedeckte Blickfeld, sowie die realisierte Gesamteyeboxgröße sind gegenüber dem Frontscheiben-Prototyp

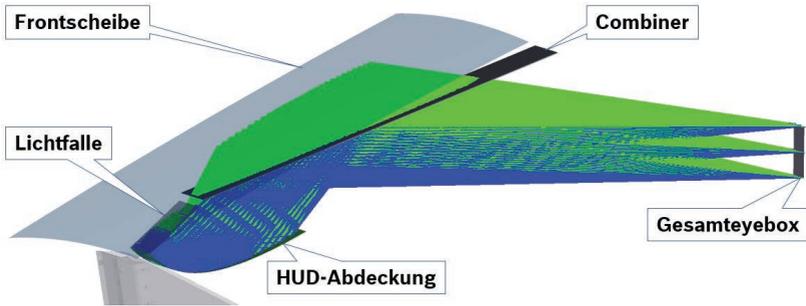


Abbildung 5.31: Ausgelegte HUD-Abdeckung (Glare Trap) für das optische Design des Fahrzeugdemonstrators. Da sowohl Reflektionen über die Frontscheibe, als auch über den Combiner abgeblendet werden müssen, fällt die Lichtfalle entsprechend groß aus.

erhöht. Die erreichten Spotgrößen der simulierten Abbildung des virtuellen Bildes auf die Displayfläche sind bedingt durch die geringere Anzahl an Spiegeln und räumliche Rahmenbedingungen auf durchschnittliche $58 \mu\text{m}$ gestiegen.

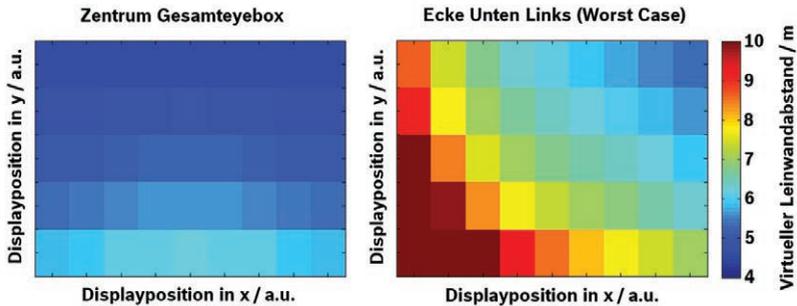


Abbildung 5.32: Simulativ bestimmte, virtuelle Leinwanddistanz unterschiedlicher Displaybereiche im Fahrzeugdemonstrator. Die Auswertung des Designs erfolgte mit Hilfe eines Matlab-Programms des Bosch Geschäftsbereiches *Car Multimedia* [98].

Parameter	Wert	Beschreibung
Scheibe	plan	Plane Combinerscheibe
AS	2	Anzahl Freiformspiegelelemente
VSD	5 m	Virtuelle Leinwanddistanz
σ_{VSD}	1,9 m	Standardabweichung Leinwanddistanz
FOV	$10^\circ \times 4^\circ$	Field of View (Blickfeld) in VSD
EB	140 mm \times 60 mm	Gesamteyeboxgröße
Spot	58 μ m	Durchschn. Spotgröße
Res	230 px/ $^\circ$	Übertragene Auflösung
Display	3,1", 5 : 3	Displaygröße (eine LCD-Zelle)

Tabelle 5.5: Parameter des Fahrzeugdemonstrators nach dem Design aus Abb. 5.28.

Durch die vergrößerten Spotgrößen nimmt ebenfalls die Wölbung des virtuellen Bildes zu. Abb. 5.32 zeigt dazu eine Untersuchung der Abbildungsoptik bezüglich des Leinwandabstandes für verschiedene Displaybereiche aus verschiedenen Positionen innerhalb der Gesamteyebox.

In Extrempositionen an den Ecken der Gesamteyebox tritt dabei eine deutliche Abweichung des virtuellen Leinwandabstandes an den Rändern der Displayfläche auf. Da die Abweichungen simulativ vorhergesehen werden können, kann prinzipiell die Abweichung in der virtuellen Leinwanddistanz durch eine entsprechende horizontale Parallaxe der dargestellten Objekte in diesem Displaybereich kompensiert werden.

Die Kompensation kann beispielsweise direkt in die Warpingfunktion der jeweiligen Teilbilder integriert werden. Im vorgestellten Fahrzeugdemonstrator fand diese Integration noch nicht statt.

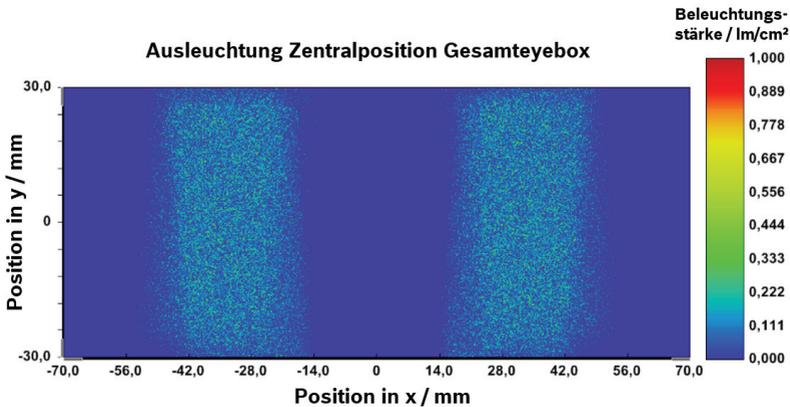


Abbildung 5.33: Simulativ bestimmte Ausleuchtung der Gesamteyebox bei Generierung der beiden schmalen Eyeboxen in Zentralposition. Verwendet wurde eine 8 mm breite Blendenöffnung vor den Mikrolinsen.

In Abb. 5.33 ist die simulative Ausleuchtung der Gesamteyebox dargestellt. Die generierten Eyeboxen werden dabei direkt durch die Form der vor den homogenisierenden Mikrolinsenarrays befindlichen Blenden bestimmt. In dieser nichtsequentiellen Simulation werden Beugungseffekte und streuende Oberflächen zunächst nicht berücksichtigt. Alle simulierten Lichtstrahlen treffen innerhalb der gewünschten Eyebox auf der Fläche der Gesamteyebox auf und es findet simulativ kein Übersprechen statt.

Werden die Blenden vor den Mikrolinsen verschoben, so verschiebt sich ebenfalls die Position der jeweiligen Eyebox. In Abb. 5.34 sind die Eyeboxen bei einer Verschiebung in den Randbereich der Gesamteyebox dargestellt. Die Form der schmalen Eyeboxen bleibt beim Verschieben weitestgehend konstant.

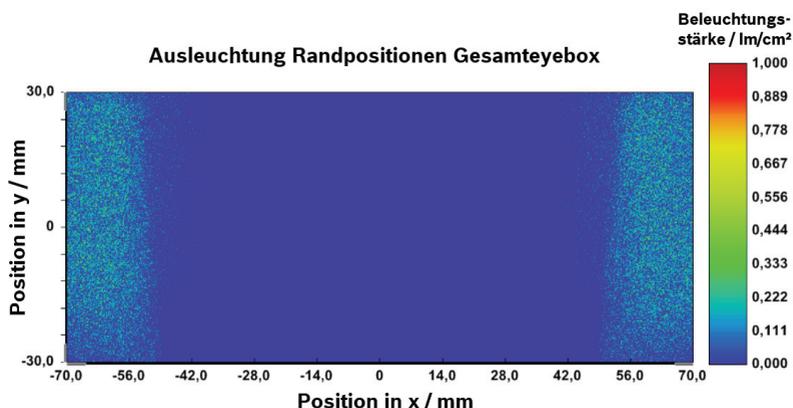


Abbildung 5.34: Simulativ bestimmte Ausleuchtung der Gesamteyebox bei Einstellung der Randpositionen der schmalen Eyeboxen mit einer 8 mm breiten Blendenöffnung vor den Mikrolinsen.

Eine Untersuchung des virtuellen Bildeindrucks aus den Randpositionen heraus ist in Abb. 5.35 dargestellt. Das simulierte Beobachterauge besitzt dabei jeweils eine Apertur von 8 mm und befindet sich auf mittlerer Höhe in der Gesamteyebox. Der Rand dieser Apertur grenzt direkt an den Rand der Gesamteyebox. Der simulierte Bildinhalt entspricht der aus Abb. 5.9 auf S. 122 bekannten Blendenform. Erkennbar sind auch die beiden unterschiedlichen Verzerrungen, die im jeweiligen Teilbild auftreten und durch die Bildtrennung im autostereoskopischen HUD separat korrigiert werden können.

Durch die verwendete Methode der Untersuchung des vom Beobachterauge gesehenen virtuellen Bildes kann der Bildeindruck aus verschiedenen Positionen innerhalb der schmalen Eyebox betrachtet werden. Dadurch wird eine Formung der Eyebox sichergestellt, durch die das virtuelle Bild aus jeder Position der Gesamteyebox und aus einem Bereich ausreichender Breite und Höhe innerhalb der schmalen Eyebox gesehen werden kann.

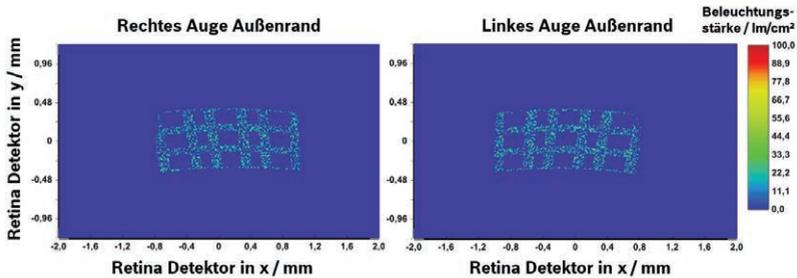


Abbildung 5.35: Abbildung zweier Testbilder auf der Netzhaut eines Beobachters. Das Beobachterauge befindet sich jeweils am äußeren Rand der Gesamteyebox in den dortigen Eyeboxen aus Abb. 5.34.

5.4.2 AUFBAU EINES FAHRZEUGDEMONSTRATORS

Mechanische Konstruktion

Die mechanische Konstruktion zur Umsetzung des optischen Konzepts im Fahrzeugdemonstrator ist in Abb. 5.36 dargestellt. Die Konstruktion erfolgte im Rahmen des Bosch Projekts „Autostereoskopisches HUD“ [93]. Der Aufbau der Optiken entspricht der Darstellung aus Abb. 5.28 mit abknickenden Hinterleuchtungszeigen der beiden LCD-Zellen im Strahlteilerkonzept. Die Spiegel wurden für den realen Aufbau vergrößert, um durch Toleranzen bedingte, simulativ abgeschätzte Abweichungen der Eyeboxposition von 9 mm zur idealen Lage auszugleichen und ein Beschneiden des Bildes zu verhindern (vgl. Vorgehen in Kap. 2.2).

Die Mechanik ist unterteilt in die beiden Blöcke der Abbildungsoptik und der PGU, wobei der PGU-Teil mit dem Strahlteiler abschließt und in einen dafür vorgesehenen Schacht im Gehäuse der Abbildungsoptik geschoben und dort arretiert werden kann. Die genaue Position des Arretierens ermöglicht das Einstellen des Abstandes von der

Displayebene der PGU zum ersten Abbildungsspiegel und damit eine Einstellung bzw. die Justage der virtuellen Leinwanddistanz.

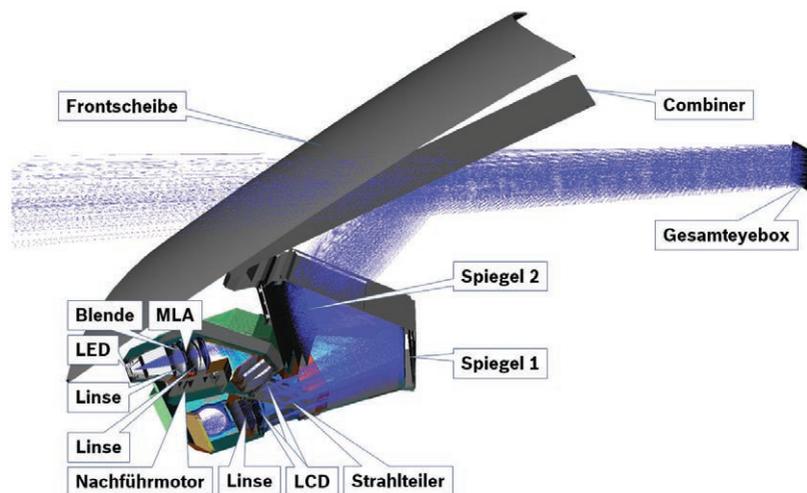


Abbildung 5.36: Mechanischer Aufbau des Fahrzeugdemonstrators. Die mechanische Konstruktion fand im Rahmen des Bosch Projekts „Autostereoskopisches HUD“ statt [93].

Die Konstruktion ist weitestgehend unbeweglich und kann über das Gehäuse fest mit dem Fahrzeug verbunden werden. Innerhalb des Gehäuses sind die beiden Blenden vor den MLAs jeweils mit einem Motor des Typs M-683 von der Firma *Physical Instruments* gekoppelt, um die Position nachzuführen. Die Blendenöffnung besitzt dabei eine Breite von 8 mm.

Eine Aufnahme des realen Aufbaus findet sich in Abb. 5.37. Das mechanische Gehäuse ist dabei auf einer Lochplatte montiert. Der Combiner wird mit Hilfe von Montagearmen gestützt, die nach der Integration ins Fahrzeug abgenommen werden können. Ein Teil der notwendigen Elektronik zur Ansteuerung der LCD-Zellen ist

bereits in das Gehäuse integriert, um kurze Kabellängen zu den Zellen zu ermöglichen.

Im Fahrzeug ist die Positionierung der Kameras an gewisse Rahmenbedingungen gebunden. So dürfen die Kameras beispielsweise nicht vom Lenkrad verdeckt werden oder die Sicht auf die Straße behindern. Aus diesem Grund wurde sich beim Fahrzeugdemonstrator für das Head-Tracking System der Firma *Seeing Machines* entschieden, bei dem die beiden Kameras flexibel positioniert werden können. Die beiden Kameras wurden jeweils seitlich neben dem Lenkrad angeordnet.

Da das verwendete Head-Tracking System keine separaten Augenpositionen liefert, kann sich das System nicht automatisch auf den Augenabstand des Nutzers einstellen und muss manuell angepasst werden.

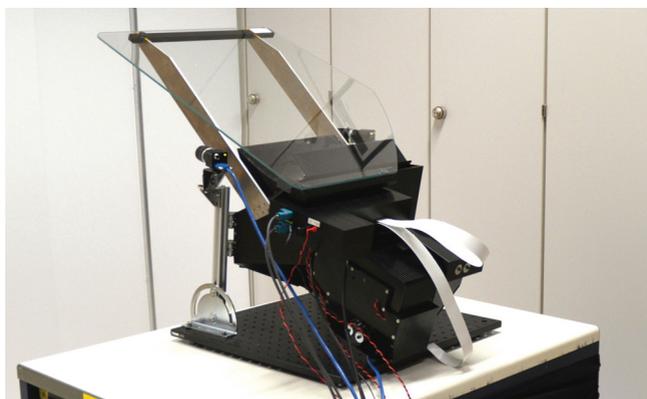


Abbildung 5.37: Realisierter Fahrzeugdemonstrator vor dem Einbau. Das System befindet sich im eigenen mechanischen Gehäuse, das im Fahrzeug verbaut werden kann. Die Combinerscheibe wird zu diesem Zeitpunkt durch Montagehilfen gestützt. Die Bildrechte liegen bei der Robert Bosch GmbH.

Für die Hinterleuchtung wurden LEDs des Typs SST-90 der Firma *Luminus* eingesetzt, die Lichtströme von über 2100 lm erreichen können [101]. Die LEDs wurden mit zusätzlichen Linsenaufsätzen mit der Funktion eines Reflektors versehen, um der nachfolgenden Kollimationslinse einen größeren Anteil des abgestrahlten Lichts zuzuführen.

Software zur Ansteuerung

Die Ansteuerung des HUD-Systems erfolgt über ein für den Prototypen geschriebenes C#-Programm. Über das Programm kann ein Pulsgenerator angesteuert werden, der den Strom der Lichtquellen in einstellbarer Frequenz moduliert. Die hohe Modulationsfrequenz liegt dabei weit über der Bildwiederholrate der LCD-Zellen und ist für das Auge nicht mehr sichtbar. Auf diese Weise kann das System bei voller Farbtiefe stufenlos in der Helligkeit gedimmt werden, was die Anpassung an unterschiedliche Fahrsituationen ermöglicht.

Das blendengesteuerte Nachführsystem wird ebenfalls über das Programm angesteuert. Dabei sind die Breite des Toleranzintervalls der Nachführung, Offsets zu den Kameradaten, maximale Grenzen für die Verfahwege der Motoren, sowie ein Umrechnungsfaktor der Motorposition in Eyeboxkoordinaten einstellbar (vgl. Kap. 5.2.4). Das System lässt sich über das Programm ebenfalls an verschiedene Augenabstände anpassen. Im Anhang in Kap. A.3.2 auf S. 233 findet sich eine Darstellung der Benutzeroberfläche.

Charakterisierung

Abb. 5.38 zeigt das mit einer Kompaktkamera aufgenommene virtuelle Bild bei Darstellung eines Testgitters mit deaktiviertem bzw.

aktiviertem Warping. Die Warpingfunktion, nach der die Verzerrung kompensiert wird, wurde im Rahmen des Bosch Projekts aus dem vorgestellten optischen Design bestimmt [59].

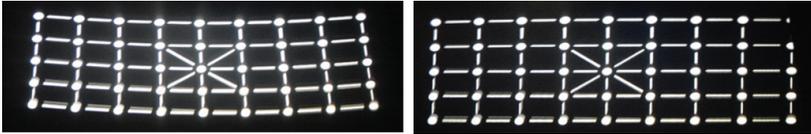


Abbildung 5.38: Links: Virtuelles Bild beobachtet aus der rechten Eye-box bei Darstellung eines Testgitters. Rechts: Entzerrtes Bild nach Aktivierung des kompensierenden Warping.

Eine Leuchtdichteaufnahme des virtuellen Bildes bei Darstellung einer Testszene ist in Abb. 5.39 dargestellt.



Abbildung 5.39: Leuchtdichte des virtuellen Bildes in der rechten Eye-box bei Darstellung einer Beispielszene in logarithmischer Skala über zwei Dekaden. Die einzelnen Elemente im Bild wurden von der Firma BMW zur Verfügung gestellt [102].

Die Elemente können dabei einzeln über die Graustufen des Bildes in ihrer Helligkeit angepasst werden, womit insbesondere auch der durch den Verlauf der Gesamteyebox verursachte Helligkeitsabfall zum Bildrand hin kompensiert werden kann. Die Aufnahme erfolgte bei aktivem Warping.

Die in Abb. 5.40 gezeigte Messung des Leuchtdichteverlaufs auf einem in der Gesamteyebox positionierten Schirm zeigt ein Abflachen der schmalen Eyebboxen zum Rand hin.

Die Kurven lassen sich anders als beim Frontscheiben-Prototyp aus Kap. 5.3.2 allerdings nicht mehr über ein einfaches Gauß-Profil beschreiben, sondern sind dem gegenüber verbreitert mit steileren Flanken. Als Idealfall wäre eine Top-Hat-Formung der Eyebox zu betrachten. Aufgrund von Streu- und Beugungseffekten erreicht die Flankensteilheit nicht die der ebenfalls mit eingezeichneten, simulativ bestimmten Kurven.

Das Ergebnis einer alternativen Form der Untersuchung der Eyeboxbreite ist in Abb. 5.41 dargestellt. Dabei wurde eine Leuchtdichtekamera bei fest stehender Nachführung innerhalb der Gesamteyebox durch die schmale Eyebox hindurch bewegt und jeweils die mittlere Leuchtdichte des virtuellen Bildes bestimmt. Die Methode zeigt vergleichbare Ergebnisse zur bereits in Abb. 5.40 gezeigten Kurve.

Der Helligkeitsverlauf der Eyebboxen allein bestimmt aufgrund möglicher Inhomogenitäten im virtuellen Bild noch nicht die nutzbare Eyeboxbreite des Systems. Ist aus einer bestimmten Augenposition heraus ein am Rand abgeschnittenes Bild sichtbar, so kann die Eyebox durch die Helligkeit des restlichen Bildes hell ausgeleuchtet sein, während sich das komplette Bild aus dieser Position heraus bereits

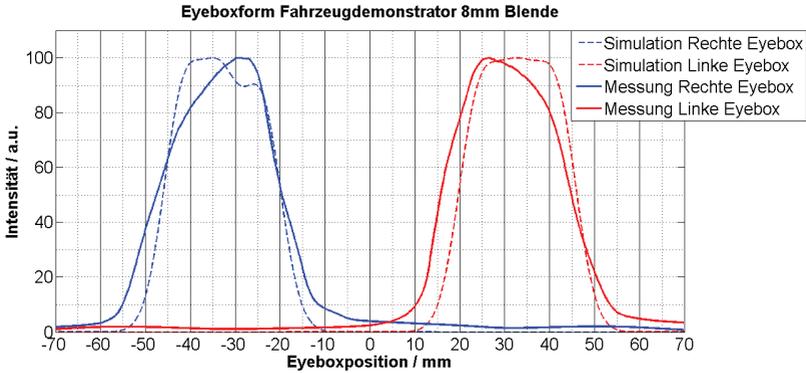


Abbildung 5.40: Vergleich der simulierten und vermessenen Eyeboxform des Fahrzeugdemonstrators als Querprofil durch die Gesamteyebow. Die Messkurve ist gegenüber der Simulation verbreitert und besitzt weniger scharfe Kanten. Es ist ein Helligkeitsabfall der Eyebox zum äußeren Rand hin zu beobachten.

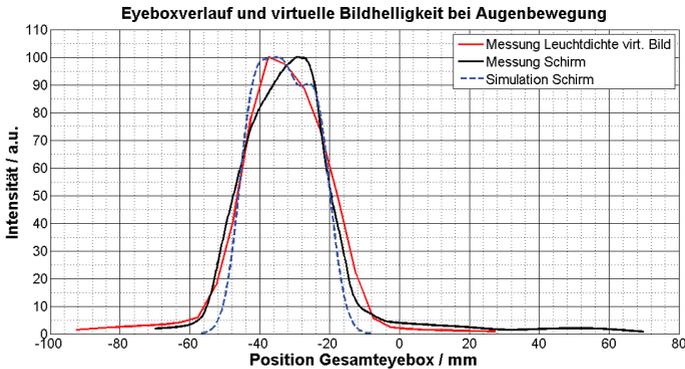


Abbildung 5.41: Vergleich der Eyeboxform des rechten Auges mit dem Intensitätsverlauf des virtuellen Bildes beim Durchwandern der Eyebox mit einer Leuchtdichtekamera. Die Kurve gibt den Verlauf der mittleren Leuchtdichte im virtuellen Bild eines vollflächig weißen Testbildes an.

nicht mehr betrachten lässt. Während sich der nutzbare Bereich simulativ mit der Integration des Beobachterauges überprüfen lässt (vgl. Kap. 2.3.3), muss der virtuelle Bildeindruck experimentell aus verschiedenen Positionen innerhalb der Eyebox evaluiert werden.

14 mm Blende

Da das verwendete Head-Tracking System keine einzelnen Positionen für die beiden Augen liefert, wird der Augenabstand des Systems nicht automatisch angepasst und muss manuell auf jeden Nutzer eingestellt werden. Bei Verwendung der Blenden von 8 mm Breite und der daraus resultierenden, schmalen Eyeboxform (vgl. Abb. 5.40) ist diese Anpassung erforderlich, um die für die Nachführung notwendige Bewegungstoleranz in der Eyebox zu gewährleisten.

Breitere Eyeboxformen sind anfälliger für ein Übersprechen, insbesondere wenn die inneren Grenzen zum anderen Auge hin verschoben werden. Eine Verbreiterung nach außen hin trägt wenig zur Entstehung von Übersprechen bei und verhindert auch bei schnellen Bewegungen und hoher Latenzzeit das Verlassen des Eyeboxbereiches des einen Auges. Da das Hinterleuchtungskonzept des Fahrzeugdemonstrators ohnehin das Licht zur Ausleuchtung der äußeren Bereiche der Gesamteyebbox bereithält, tritt kein Helligkeitsverlust bei einer Verbreiterung der Eyeboxen auf.

Um das System toleranter gegenüber verschiedenen Augenabständen zu machen und höhere Latenzzeiten zu tolerieren, wurde daher die Breite der Blendenöffnung auf 14 mm erhöht.

Abb. 5.42 zeigt eine Vermessung der Eyeboxbreite auf einem in der Gesamteyebbox platzierten Schirm. Die Eyeboxen sind bedingt durch die größere Blendenöffnung deutlich verbreitert. Ein Helligkeitsabfall zum Rand der Gesamteyebbox ist erkennbar.

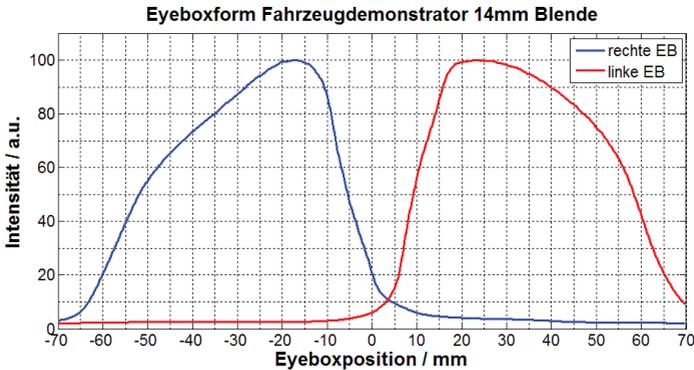


Abbildung 5.42: Eyeboxverlauf bei Einsatz einer 14 mm breiten Blende vor den Mikrolinsenarrays. Der Helligkeitsabfall der Eyeboxen zum Rand hin folgt aus der Faltung mit dem Helligkeitsverlauf der Gesamteyebbox.

In Abb. 5.43 findet sich eine Leuchtdichteaufnahme des virtuellen Bildes bei Darstellung einer weißen Vollfläche. Verwendet wurde eine 14 mm breite Blende vor den MLAs. Die Homogenität des Bildes über die neun Teilfelder bestimmt sich zu 2,0. Es ist ein Helligkeitsabfall hin zum Rand des Bildes erkennbar, der über die Graustufen des Bildinhaltes ausgeglichen werden kann.

Eine Zusammenfassung von einigen Messwerten des Systems findet sich in Tab. 5.6. Die messtechnisch ermittelte Leinwanddistanz liegt mit 4,7 m leicht unter den im Design angestrebten 5 m. Auch das Blickfeld der virtuellen Anzeige ist gegenüber den $9^\circ \times 4^\circ$ des Designs leicht reduziert. Durch die Verwendung der 14 mm breiten Blende konnten relativ breite Eyeboxen von durchschnittlich 49 mm bei einem Übersprechen von 3,5 % realisiert werden. Das Übersprechen liegt damit in etwa auf dem Niveau des Frontscheiben-Prototyps aus Kap. 5.3 und ist zu großem Anteil auf die Beugungseffekte in der

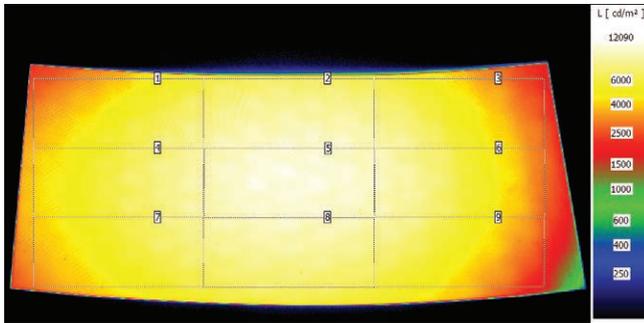


Abbildung 5.43: Leuchtdichte des Fahrzeugdemonstrators in logarithmischer Skala über 2 Dekaden im virtuellen Bild der rechten Eyebox bei Darstellung einer weißen Vollfläche. Das Verhältnis der hellsten und dunkelsten Teilfläche bestimmt die Homogenität zu 2, 0.

LCD-Zelle zurückzuführen (vgl. Kap. 5.2.3). Die gemessene Auflösung wird limitiert durch die Auflösung der Messkamera und liefert eine untere Abschätzung.

Durch den Einsatz der lichtstarken LEDs konnte die Leuchtdichte des Bildes gegenüber dem Frontscheiben-Prototyp trotz der Umstellung auf das Licht ausblendende Hinterleuchtungskonzept deutlich erhöht werden.

Messungen Fahrzeugdemonstrator		
VSD	4,7 m	Virt. Leinwanddistanz im Zentrum
FOV	$8,9^\circ \times 3,6^\circ$	Blickfeld
EB	49 mm	Breite der Einzeleyebox (FWHM)
Leuchtdichte	6148 cd/m^2	Erreichte mittlere Leuchtdichte
Granulation	2,1 %	Granulation im weißen Vollbild
Homogenität	2,6	Homogenität des virtuellen Bildes
Kontrast	3717 : 1	Schwarz-Weiß-Kontrast
4 % Kontrast i	318 : 1	4 % Kontrast innen
4 % Kontrast a	1510 : 1	4 % Kontrast außen
Übersprechen	3,5 %	Übersprechen der Teilbilder
Gesamteyebox	> 140 mm × 60 mm	Größe der Gesamteyebox
Auflösung	> 408 px × 239 px	Auflösung im virt. Bild (MTF 30%)

Tabelle 5.6: Übersicht über einige Messwerte des Fahrzeugdemonstrators. Die Werte stellen jeweils die Mittelwerte aus rechter und linker Eyeboxposition dar und beziehen sich auf das System mit einer verbauten MLA-Blende von 14 mm Öffnungsbreite. Das dazugehörige optische Design findet sich in Abb. 5.28.

5.5 DIREKTABBILDENDER LENTIKULARLINSENANSATZ

Autostereoskopische Displaysysteme können auf Basis einer mit Lentikularlinsen versehenen LCD-Zelle realisiert werden [103]. Solche Systeme werden meist für 3D Monitore mit direkter Draufsicht verwendet [104, 105, 106]. Die Idee einer Adaption auf ein HUD-System besteht seit einigen Jahren, wurde aber noch nicht umgesetzt [107]. Im folgenden Abschnitt wird daher ein Ansatz untersucht, bei dem unter Verzicht jeglicher Abbildungsoptik ein auf Lentikularlinsen

basierendes, autostereoskopisches Display direkt über die Frontscheibe eingespiegelt wird. Dadurch ergibt sich ein System mit reduziertem Bauraum, der eine wesentliche Einschränkung bei der Realisierung eines Head-up Displays darstellt.

Es wurde dafür ein Display der Firma *Seefront* mit einer Bilddiagonale von 13,3" eingesetzt. Die Herausforderungen des Konzepts liegen in der Reduktion des an der Frontscheibe entstehenden Doppelbildes und in der Vermeidung von blendenden Sonnenreflektionen. Der Einsatz in einem HUD-System erfordert außerdem die Anpassung der Hinterleuchtung der LCD-Zelle, um das Licht innerhalb der gewünschten Gesamtebox zur Verfügung zu stellen.

5.5.1 SYSTEMAUFBAU

Das Prinzip zur Trennung der beiden stereoskopischen Teilbilder einer mit Lentikularlinsen versehenen LCD-Zelle ist in Abb. 5.44 dargestellt. Das jeweilige Auge schaut über die Linsenstruktur auf streifenförmige Teilbereiche der LCD-Zelle. Die zu den beiden Augen gehörenden Bereiche liegen getrennt voneinander. Um den stereoskopischen Bildeindruck zu erzeugen, werden die Teilbilder segmentiert und auf die vom jeweiligen Auge gesehene Abschnitte geschaltet.

Bei einer Bewegung des Beobachters wandern die sichtbaren Streifen über die LCD-Zelle. Auch in diesem System liefert daher ein Head-Tracking System die Augenpositionen zur Ansteuerung der benötigten Pixel. Die Nachführung erfolgt in diesem Falle durch die Sortierung der Pixel rein elektronisch und beinhaltet daher keine mechanische Latenzzeit. Die vom Auge wahrgenommene Auflösung reduziert sich durch die Unterteilung der Pixelbereiche.

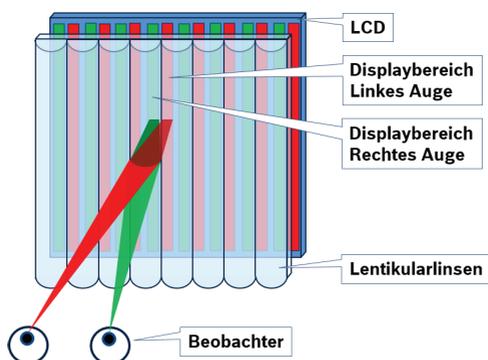


Abbildung 5.44: Prinzip der stereoskopischen Bildtrennung bei einer mit Lentikularlinsen versehenen LCD-Zelle. Über die Mikrolinsen schaut das Auge jeweils nur auf streifenförmige Bereiche der LCD-Zelle. Auf die einem Auge zugeordneten Bereiche wird jeweils das entsprechende Teilbild aufgeschaltet.

In Abb. 5.45 ist das untersuchte HUD-System dargestellt. Das 3D-Display ist direkt unter der Frontscheibe angeordnet und spiegelt sich in kurzem Abstand über die Frontscheibe ein. Durch die auf den Lentikularlinsen basierende Bildtrennung strahlt das Display getrennte Teilbilder ab. Die Kameras beobachten den Fahrer über die Reflektion an der Frontscheibe.

Das verwendete 3D-Display der Firma *Seefront* ist werkseitig kalibriert, um bei direkter Draufsicht verwendet zu werden. Die Head-Tracking Kameras sind oberhalb des Displays angebracht. Durch die Abbildung über die Frontscheibe erfährt das dargestellte Bild eine Verzerrung und die exakte Zuordnung der Pixel zu den Augenpositionen geht verloren. Die generierten Eyeboxen werden durch die Frontscheibenreflektion verwaschen, was das Übersprechen deutlich erhöht. Prinzipiell kann das System angepasst werden, sodass die Kameras den Fahrer direkt beobachten und die erfassten Koordinaten der

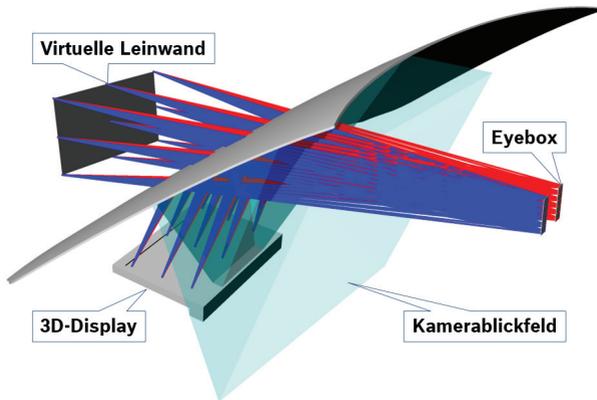


Abbildung 5.45: Aufbau des autostereoskopischen HUD-Systems basierend auf einer mit Lentikularlinsen versehenen LCD-Zelle. Ein autostereoskopisches Display wird direkt über die Frontscheibe eingespiegelt.

Augenpositionen entsprechend umgerechnet werden. Die Zuordnung der Pixel zu den Augenpositionen muss für das System mit Frontscheibe angepasst werden [108, 109].

Um simulative Untersuchungen an einem realitätsnahen System durchführen zu können, wurden Lentikularlinsen ausgelegt, die in Verbindung mit einer LCD-Zelle zwei separate Eyeboxen erzeugen. Die Kenndaten einer sequentiellen Simulation sind in Tab. 5.7 aufgelistet. Simuliert wurde die Abbildung eines virtuellen Bildpunktes auf die Displayfläche mit den schmalen Eyeboxen als Systemaperturen in zwei Konfigurationen bei Einsatz einer flachen Scheibe als Combiner. Das System wurde optimiert, um eine geringe Spotgröße zu erreichen, wobei bei den beiden abgebildeten Punkten auf dem Display ein Versatz in Größenordnung des halben Pitches der Lentikularlinsen angestrebt wurde. Die Lentikularlinsen wurden senkrecht angeordnet,

sodass die Linsen parallel zu den Displayspalten verlaufen. Dadurch ergeben sich senkrecht verlaufende Streifen auf dem Display, die dem jeweiligen Auge zugeordnet sind.

Durch eine senkrechte Anordnung der Mikrolinsen kann durch Beugung am Linsenraster oder durch Streuung an den Kanten zwischen den Linsen erhöhtes Übersprechen entstehen. Um diese streuenden und beugenden Anteile in andere als die horizontale Richtung zu lenken, in der sich das andere Auge befindetet, können die Mikrolinsen in schrägen Winkeln oder gar diagonal auf dem Display angeordnet werden. Durch schräg verlaufende Lentikularlinsen kann auch ein gleichmäßigerer Verlauf des Bildeindrucks bei einer horizontalen Bewegung des Beobachters erreicht werden, da die zum Linsenraster schräg verlaufenden Pixel der LCD-Zelle nicht spaltenweise gleichzeitig umschalten [110].

Parameter	Wert	Beschreibung
VID	0,9 m	Virtuelle Leinwanddistanz
EB	20 mm × 60 mm	Eyeboxgröße
d_{Auge}	65 mm	Augenabstand
gEB	140 mm × 60 mm	Gesamteyeboxgröße
Display	294 mm × 165 mm	Größe des 3D-Displays
Pitch	100 μm	Pitch der Zylinderlinsen
R_{MLA}	653 μm	Radius der Mikrolinsen (konvex)
d_{MLA}	1 mm	Dicke des Mikrolinsenarrays
d_{spot}	50 μm	Abstand der Displaybereiche

Tabelle 5.7: Systemparameter einer sequentiellen Zemax Simulation zur Auslegung eines auf Lentikularlinsen basierenden, autostereoskopischen LCD-Systems.

Zur Überprüfung der Funktionalität des entworfenen Systems wurde eine Methodik in nichtsequentieller Simulation entwickelt, durch die

die Zuordnung der einzelnen Pixel des Display zu den Augenpositionen bestimmt und überprüft werden kann. Das System lässt sich dabei beispielsweise an eine Frontscheibe anpassen und in weiteren Designschritten simulativ auslegen.

Von der Hinterleuchtung ausgehende Lichtstrahlen beleuchten dazu eine als hoch aufgelöster Detektor simulierte Displayebene. Die Strahlen passieren die Lentikularlinsen nach dem Detektor und werden bis zur virtuellen Leinwand hin verfolgt. Aus der Gesamtheit der gewonnenen Strahldaten wird überprüft, aus welchen Displaybereichen diejenigen Strahlen stammen, die auf eine definierte, schmale Eyebox innerhalb der Gesamteyebox treffen. Zur Bestimmung der streifenförmigen, dieser schmalen Eyebox zugeordneten Bereiche auf der Displayfläche wird die Verteilung der ermittelten Strahlen auf dem Display untersucht.

Im ausgelegten System nach Tab. 5.7 mit planer Combinerscheibe konnte die Generierung streifenförmiger, voneinander getrennter Displayabschnitte nachgewiesen werden. In einem weiteren Schritt wurde die plane Combinerscheibe durch eine realistische Frontscheibenform ersetzt und eine weitere Simulation durchgeführt. Der Krümmungsradius der Lentikularlinsen wurde dabei zur Anpassung des Systems auf $550\ \mu\text{m}$ verringert. In Abb. 5.46 findet sich ein Ausschnitt des Simulationsergebnisses. Das Diagramm zeigt das Querprofil eines $0,5\ \text{mm}$ breiten, horizontalen Abschnittes auf der Displayfläche.

Die beiden Kurven geben jeweils die Gesamtintensität des durchstrahlenden Lichtes auf der Displayfläche an, das jeweils der linken bzw. der rechten Eyebox zugeordnet werden kann. Es ergeben sich streifenförmige Bereiche, die jeweils nur in eine Eyebox strahlen. Da die Teilbereiche direkt aneinander grenzen und sogar leichte Überlappung zeigen, kann geschlossen werden, dass die von den einzelnen Displaybereichen erzeugten Eyeboxen eine Breite besitzen,

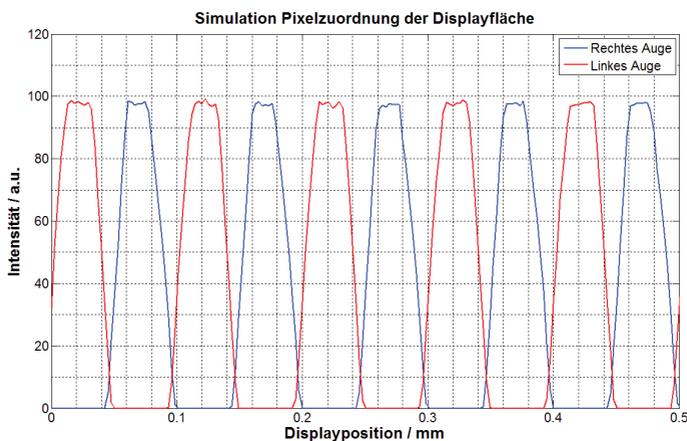


Abbildung 5.46: Nichtsequentielles Simulationsergebnis zur Überprüfung der Funktionalität des ausgelegten Mikrolinsenarrays nach Tab. 5.7. Über einen kleinen, horizontalen Abschnitt auf der Displayfläche ist hier aufgetragen, welche Bereiche Strahlen zur jeweiligen Eyebox aussenden. Es ist zu erkennen, dass streifenförmige Bereiche des Displays immer jeweils nur zu einer Eyebox strahlen. Dadurch können mittels Aufschaltung des jeweiligen Teilbildes auf diese Displaystreifen den Augen unterschiedliche Bildinformationen zugeführt werden.

die nahe an den Bereich des anderen Auges heran reicht. Ein direktes Aneinandergrenzen der Teilbereiche verspricht den geringsten Auflösungsverlust durch die stereoskopische Bildtrennung. Jedes Auge nimmt dann die halbe Displayauflösung wahr. Ein Übersprechen durch überlappende Zwischenbereiche kann vermieden werden, indem die entsprechenden Pixel schwarz geschaltet werden.

Die Nachführung des Systems ist elektronisch durch eine Verschiebung der Displayabschnitte realisiert, denen das jeweilige Teilbild aufgeschaltet ist. Die Schrittweite der Verschiebung ist durch die Pixelstruktur der LCD-Zelle limitiert. Die Teilbereiche werden dabei

mindestens um einen Subpixel der einzelnen RGB-Pixel der LCD-Zelle verschoben. Die Gruppierung der Subpixel zu einem RGB-Pixel ändert sich dann mit der Verschiebung.

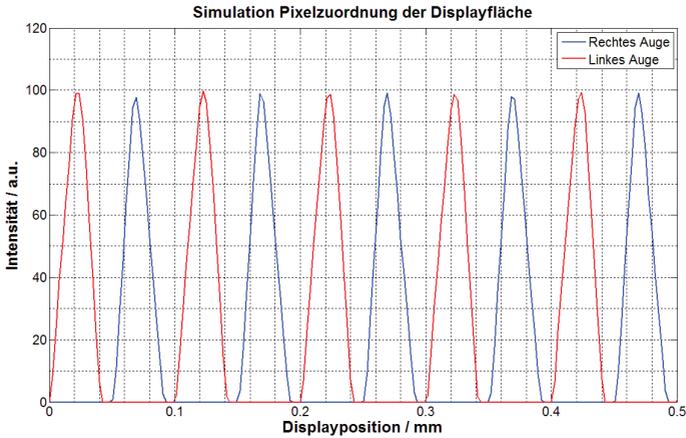


Abbildung 5.47: Simulationsergebnis einer Untersuchung der Eyebox-ausleuchtung einzelner Displayabschnitte. Das System entspricht dem aus Abb. 5.47 mit einer Anpassung des Mikrolinsenradius auf $450\ \mu\text{m}$.

Zur deutlicheren Trennung der zu jeweils einer Eyebox strahlenden Displaybereiche wurde der Krümmungsradius der Mikrolinsen in einer weiteren Untersuchung auf $450\ \mu\text{m}$ verringert. Das Ergebnis der Simulation ist in Abb. 5.47 dargestellt. Durch die Verringerung des Radius der Lentikularlinsen trennen sich die Displaybereiche deutlicher.

5.5.2 DOPPELBILDUNTERSUCHUNG

Durch die vorder- und rückseitige Reflektion an der Frontscheibe entstehen ungewollte Doppelbilder, deren Versatz mit vom Abstand der virtuellen Leinwand abhängt. In Abb. 5.48 ist das Ergebnis einer Simulation dargestellt, bei der der Winkelversatz zwischen Bild und Doppelbild aus der Beobachterposition in Abhängigkeit der virtuellen Leinwanddistanz untersucht wurde.

Die beiden Kurven beschreiben Systeme mit planer Frontscheibe und einer Scheibe mit einem vertikalen, sphärischen Krümmungsradius von 6054 mm als Annäherung an eine gekrümmte Frontscheibe. In beiden Systemen ist die Scheibe um 60° gegenüber dem einfallenden Strahl der Head-up Optik und auch zur Horizontalen im Fahrzeug geneigt.

Es ist erkennbar, dass der Doppelbildversatz für große Leinwanddistanzen bei planen Scheiben gegen 0° strebt, da der von der planen Scheibe erzeugte, konstante Versatz bei großen Distanzen immer kleinere Blickwinkel einnimmt. Der Doppelbildversatz der gekrümmten Scheibe liegt stets über dem der planen Ausführung. Bei niedrigen virtuellen Bildabständen steigen die Bildversätze enorm an. Da das untersuchte Konzept einer direkten Einspiegelung des auf Lentikularlinsen basierenden Displays zu einer sehr kurzen, virtuellen Leinwanddistanz im Bereich von etwa 1 m führt, ergeben sich hohe Versätze des Doppelbildes.

Keilwinkelförmiger Frontscheibenverlauf

Konventioneller Weise werden die an der Außenseite entstehenden Doppelbilder durch einen keilförmigen Verlauf der Frontscheibe so umgelenkt, dass das Doppelbild mit dem eigentlich genutzten Bild

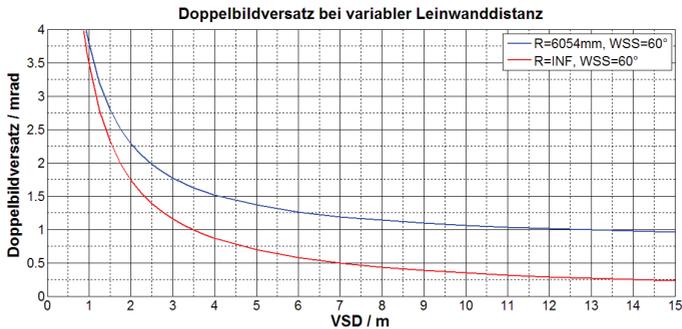


Abbildung 5.48: Doppelbildversatz zwischen Bild und Doppelbild in Abhängigkeit von der virtuellen Leinwanddistanz. In Rot ist die simulativ ermittelte Kurve für eine plane Scheibe dargestellt, die 60° zum Einfallstrahl geneigt ist. In Blau dargestellt ist die Kurve einer angenäherten Frontscheibe mit einem Krümmungsradius von 6054 mm in der Vertikalen.

zusammenfällt. In Abb. 5.49 ist das Prinzip dargestellt. Darin ist eine keilförmige Folie in die Frontscheibe eingebettet, durch die die beiden reflektierenden Flächen an der Innen- und Außenseite der Scheibe in einem geringen Winkel zueinander stehen. Während eine planparallele Scheibe einen Doppelbildpunkt über dem eigentlichen Bildpunkt erzeugen würde, wird der virtuelle Bildpunkt des Doppelbildes hier überlagert. Diese Überlagerung findet nur in einem speziellen Abstand des virtuellen Bildes statt, der vom Keilwinkel und der Scheibendicke abhängig ist.

Der erforderliche Keilwinkel in der Frontscheibe hängt vom Krümmungsradius der Scheibe, vom Einfallswinkel der Bildstrahlen auf die Scheibe, der Scheibendicke und von der realisierten virtuellen Leinwanddistanz ab. Da der zur Verfügung stehende Bauraum im Fahrzeug die Einbauposition und damit auch den Einfallswinkel

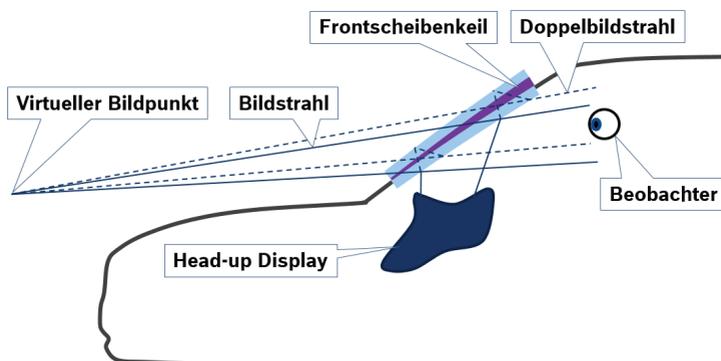


Abbildung 5.49: Funktionsprinzip der Doppelbildüberlagerung im HUD-System mittels einer Keilfolie. Durch die in die Frontscheibe integrierte, keilförmige Folie sind Innen- und Außenseite der Scheibe zueinander geneigt und der durch die Außenreflektion erzeugte Bildpunkt des Doppelbildes wird virtuell mit dem eigentlichen Bildpunkt überlagert.

der Bildstrahlen eingrenzt und die Scheibendicke und Form weitestgehend vorgegeben sind, bleibt die virtuelle Leinwanddistanz als wesentlicher Designfaktor.

In Abb. 5.50 ist das Ergebnis einer Simulation zur Bestimmung notwendiger Keilwinkel für verschiedene Parametersätze gezeigt. Bei flach auftreffenden Bildstrahlen mit großem Einfallswinkel über 60° nimmt der notwendige Keilwinkel ab. Für die gekrümmte Scheibe liegt der Keilwinkel über dem der planen Scheibe. In allen Fällen ist ein positiver Winkel notwendig, wodurch die Scheibe sich nach oben hin verdickt.

Während bei konventionellen HUDs mit Bilddistanzen von über 2 m die Keilwinkel im Bereich unter $0,7$ mrad liegen, erreichen sie im untersuchten Konzept deutlich höhere Werte. Für ein System mit einer Leinwanddistanz von 900 mm wurde ein Keilwinkel bestimmt, der

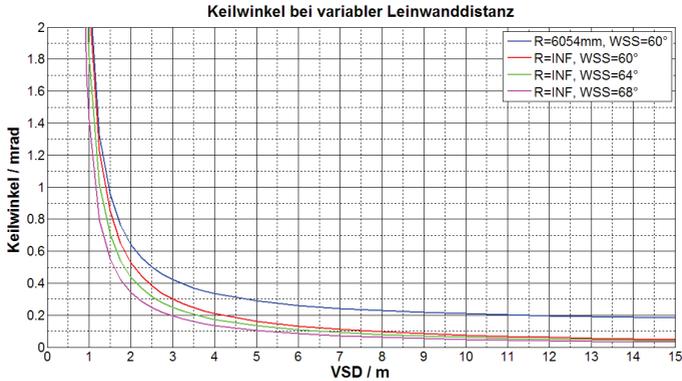


Abbildung 5.50: Notwendiger Keilwinkel bei unterschiedlichen virtuellen Leinwandabständen. Dargestellt sind drei Kurven für eine plane Frontscheibe mit unterschiedlichen Einfallswinkeln der Bildstrahlen auf die Frontscheibe und eine Kurve für einen Krümmungsradius von 6054 mm bei 60° Einfallswinkel.

den mittleren Doppelbildversatz für verschiedene Punkte des Displays aus verschiedenen Beobachterpositionen heraus minimiert. Das Ergebnis ist in Tab. 5.8 dargestellt. Der Keilwinkel wurde zu 2,78 mrad bei verbleibenden mittleren Doppelbildversätzen von 0,44 mrad in x- und 0,55 mrad in y-Richtung bestimmt.

Das Field of View bzw. die Displaygröße wurden hier festgelegt, um in einem Abstand von 15 m stereoskopische Bildinhalte in einem Blickfeld von $9^\circ \times 4^\circ$ angezeigt werden können. Im Nahbereich muss das Blickfeld um einen entsprechenden Vorhalt zur gegenseitigen Verschiebung der stereoskopischen Teilbilder erweitert werden.

Das Einbringen einer Keilfolie mit einem Winkel von 2,78 mrad ist technisch herausfordernd. Das eigentliche Problem liegt aber in der Beeinflussung der realen Fahrscene. Simulativ ergibt sich im System aus Tab. 5.8 eine Umlenkung der Realszene um 4,1 mrad. Ein

Parameter	Wert	Beschreibung
VID	0,9 m	Virtuelle Leinwanddistanz
FOV	$16,4^\circ \times 7,2^\circ$	Blickfeld (Field of View)
gEB	120 mm \times 60 mm	Gesamteyebboxgröße
Display	288 mm \times 126 mm	Größe des 3D-Displays
$d_{Scheibe}$	4,6 mm	Scheibendicke vor dem Keilverlauf
w_{Keil}	2,78 mrad	Optimierter Keilwinkel
DB_X	0,44 mrad	Mittleres Doppelbild in x
DB_Y	0,55 mrad	Mittleres Doppelbild in y
DB_{max}	1,53 mrad	Maximal aufgetretenes Doppelbild

Tabelle 5.8: Simulationsparameter und Ergebnisse der Optimierung des Keilwinkels zur Überlagerung des Doppelbildes in einem HUD-System.

konstanter, durchgehender Keilwinkel durch die gesamte Frontscheibe kann auf Grund der sich ergebenden Aufdickung nicht realisiert werden. Bei einem Abflachen des Keilwinkels außerhalb des vom HUD-System genutzten Frontscheibenbereiches würde die Realszene entsprechend verzerrt werden.

Als Gesamtergebnis ist daher festzuhalten, dass die Überlagerung des Doppelbildes mittels einer konventioneller Weise verwendeten Keilfolie im Konzept der direkt eingespiegelten Displayfläche nicht realisierbar ist. Im folgenden Abschnitt wird daher eine Methodik zur Unterdrückung des Doppelbildes vorgestellt.

Doppelbildreduktion durch Polarisationsanpassung

Anstelle der Überlagerung des Doppelbildes mit dem Nutzbild kann das Doppelbild durch geeignete Maßnahmen auf ein

tolerables Niveau unterdrückt werden. Eine untersuchte Methode zur Reduktion des Doppelbildes liegt in der geeigneten Anpassung der Polarisationen bei der Reflektion an der Innen- und Außenseite der Frontscheibe [111, 112].

LCD-Zellen wirken prinzipiell bereits polarisierend und können angepasst werden, um an der Frontscheibe eine lineare Polarisation definierter Ausrichtung zu erreichen. Treffen die Bildstrahlen des HUDs mit beispielsweise 60° auf die Frontscheibe auf, so liegen sie nahe dem Brewsterwinkel (bei N-BK7 Glas z.B. bei $56,6^\circ$). Senkrecht zur Einfallsebene polarisiertes Licht wird dann reflektiert, während parallel polarisiertes Licht effizient eingekoppelt wird.

Basierend auf diesem Prinzip lässt sich nach der in Abb. 5.51 dargestellten Methode das entstehende Doppelbild verringern. Der auftreffende Strahl ist darin senkrecht zur Einfallsebene der Frontscheibenreflektion polarisiert (s-Polarisation). Das eigentlich genutzte Bild wird an der Innenseite der Frontscheibe reflektiert. Der eingekoppelte Anteil des polarisierten Lichts erfährt eine Phasendrehung innerhalb einer in die Frontscheibe integrierten Verzögerungsfolie (Retarder). Durch die Phasendrehung wird an der Außenseite die Brewsterbedingung genutzt und die Strahlen werden effizient ausgekoppelt, während nur ein geringer Teil reflektiert wird und zum Doppelbild beiträgt.

Mit entsprechend umgekehrten Polarisierungen kann auch die Reflektion an der Außenseite der Scheibe genutzt und die der Innenseite minimiert werden. Ist eine diagonal im Raum stehende Polarisation am Ort des Beobachters erwünscht, um beispielsweise das Ausfiltern durch eine linear polarisierende Sonnenbrille zu verhindern, so kann die innenseitige Reflektion der diagonal stehenden, linearen Polarisation genutzt werden. Zur effizienten Auskopplung kann die

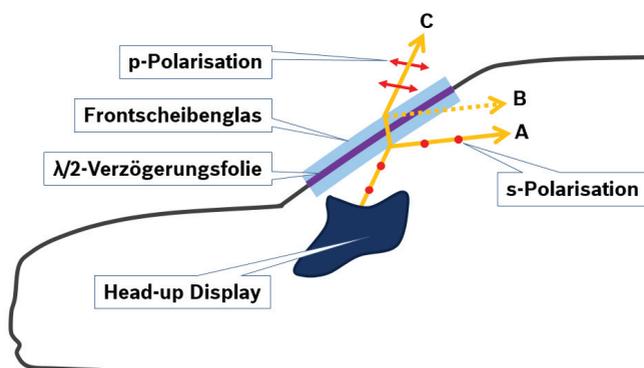


Abbildung 5.51: Funktionsprinzip der Doppelbildreduktion an der Frontscheibe durch eine Phasendrehung des Lichts. Vom Head-up Display einfallende Strahlen sind s-polarisiert und werden daher an der Scheibeninnenseite effektiv reflektiert (Strahl A). Beim Scheibendurchgang wird die Polarisation gedreht, wodurch das Licht auf die Außenseite nahe dem Brewsterwinkel in p-Polarisation auftrifft und effizient ausgekoppelt wird (Strahl C), wohingegen nur ein geringer Teil zum Doppelbild beiträgt (Strahl B).

Polarisation anschließend in der Retarderschicht zur p-Polarisation gedreht werden.

In Tab. 5.9 sind die Ergebnisse verschiedener Simulationen zusammengefasst, bei denen das Doppelbild mit unterschiedlichen Maßnahmen reduziert wurde. Die virtuelle Leinwanddistanz der Simulation beträgt jeweils 1 m bei einer Displaygröße von $126 \text{ mm} \times 288 \text{ mm}$, was einem Blickfeld von $16,4^\circ \times 7,2^\circ$ entspricht. Bei einer Verschiebung der stereoskopischen Bildinhalte auf 15 m ist dort noch ein Blickfeld von $9^\circ \times 4^\circ$ darstellbar.

Am effektivsten zeigte sich dabei das in Abb. 5.51 dargestellte Prinzip mit Nutzung der Innenreflektion, womit das Doppelbild bei realer Frontscheibenform auf 3,49 % des Nutzbildes reduziert werden konnte. In dieser Simulation wurde die Schichtdicke und Orientierung der

Achse der Retarderschicht an jeder Stelle der Frontscheibe konstant gehalten. Dadurch muss die Retarderschicht auf einen Kompromiss für alle auftreffenden Strahlen des Nutzbereichs optimiert werden. Die Simulation beschränkt sich außerdem auf eine einzelne Wellenlänge.

Doppelbild	Frontscheibe	Maßnahme
40 %	plan	WAR Standard-Coating (Wide Anti Reflection)
1,2 %	plan	Verzögerungsfolie in der Frontscheibe, s-Polarisation
3,49 %	Realform	Verzögerungsfolie in der Frontscheibe, s-Polarisation
4,2 %	Realform	Verzögerungsfolie in der Frontscheibe, p-Polarisation

Tabelle 5.9: Simulationsergebnisse verschiedener Maßnahmen zur Doppelbildreduktion an der Frontscheibe. Verglichen werden Konzepte mit in die Frontscheibe integrierten Verzögerungsschichten und eine Standardentspiegelung auf planer Scheibe. Durch die Verzögerungsschicht nach Abb. 5.51 reduziert sich das Doppelbild auf 3,49 % des Nutzbildes.

Durch die Beschränkung auf einen einschichtigen Retarder ist die Doppelbildreduktion winkelabhängig. Abb. 5.52 zeigt die Auswirkung der Positionierung des Displays unter verschiedenen Winkeln zur Frontscheibe auf die Doppelbildunterdrückung. Es wurden dabei jeweils von der gesamten Displayfläche ausgehende Strahlen berücksichtigt, die sich über die Fläche der Gesamteyebow verteilen.

Das Ergebnis ist in Abb. 5.52 dargestellt. Außerhalb des Brewsterwinkels nimmt der Doppelbildkontrast dabei deutlich ab, liegt aber zwischen 53° und 60° im Bereich über $25 : 1$. Unter der Annahme, dass das Head-up Display im Betrieb in der Helligkeit geregelt wird, sodass

ein Kontrast von beispielsweise 3 : 1 zur Fahrscene besteht, bleibt damit ein Kontrast größer 8 : 1 zwischen Fahrscene und Doppelbild.

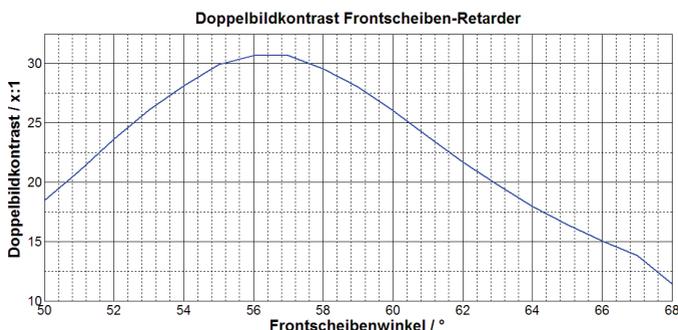


Abbildung 5.52: Simulative Bestimmung des Doppelbildkontrastes im untersuchten System mit direkt eingespiegeltem 3D-Display bei verschiedenen Winkeln zur Frontscheibe. Aufgrund des simulierten, einschichtigen Retarders nimmt der Doppelbildkontrast außerhalb des Brewsterwinkels deutlich ab.

Im realen System können achromatische Retarder eingesetzt werden, die auf den gesamten sichtbaren Wellenlängenbereich optimiert sind und wesentlich winkelunabhängiger als einschichtige Retarder sind. Solche Folien sind auf dem Markt bereits erhältlich und werden beispielsweise in LCD basierten Fernsehern eingesetzt um die ausgehende Polarisation anzupassen (z.B. auf zirkulare Polarisation).

5.5.3 SONNENLICHTREFLEKTIONEN

Ein wichtiger Designaspekt bei der Auslegung von Head-up Displays ist das Unterbinden von möglichen Sonnenlichtreflektionen, bei denen Sonnenstrahlen in das HUD-System einstrahlen, reflektiert werden und den Fahrer blenden.

Üblicherweise kann durch leichtes Verkippen der Displayfläche zur optischen Achse des Spiegelsystems verhindert werden, dass innerhalb der HUD-Optik störende Reflektionen auftreten. Bei dem hier untersuchten Konzept mit direkt über die Frontscheibe eingespiegelmtem Display ist das nicht möglich. Durch den breiten Winkelbereich, aus dem die Sonne auf das Display strahlen kann, durch die gekrümmte Mikrolinsenform auf der Oberfläche des Displays, sowie durch die großen Abmessungen der Displayfläche kann das Display nicht gekippt werden, um Reflexe bei bestimmten Sonnenständen zu vermeiden.

Im Folgenden werden daher alternative Methoden untersucht, mit denen Reflektionen mittels einer Blendenstruktur vermieden oder über eine polarisierende Abdeckung unterdrückt werden können.

Lamellenstruktur auf der Displayfläche

Als ein Ansatz zur Abschattung des Sonnenlichts wurde eine lamellenartige Struktur auf der Displayfläche betrachtet. Frei stehende, jalousienartige Lamellen transmittieren dabei nur Licht innerhalb eines bestimmten Winkelbereiches und absorbieren schräg zu den Lamellen einfallendes Licht.

Eine Lamellenstruktur, bestehend aus schräg stehenden Stegen mit 2 mm Höhe, 1 mm Abstand und 0,1 mm Dicke, wurde simulativ ausgelegt. Im wahrgenommenen Bild ergibt sich eine Abschattung von 130 μm breiten Streifen. Problematisch bei einer solchen Struktur sind die Herstellbarkeit und die Robustheit. Die Lamellen können schwerlich gegen Verschmutzung geschützt werden und wären auf dem Armaturenbrett frei zugänglich.

Eine Einbettung besonders dünner Lamellen in eine Folie ähnlich den von Monitoren bekannten Blickschutzfolien verringert die

Abschattung auf dem Display. Die Oberfläche der Folie als zur Einbettung dienendes Substrat führt allerdings selbst zu Reflektionen. Um diese Reflektionen vom Auge fern zu halten, kann die Lamellenfolie als eine HUD-Abdeckung realisiert werden, die blendende Lichtpfade vermeidet (vgl. Abb. 5.30, S. 150). Der Winkel der in die Folie laminierten Lamellen weist dabei idealer Weise einen an die Krümmung der Abdeckfolie angepassten Verlauf auf. Die Herstellung einer solchen Abdeckfolie ist mit hohem technischem Aufwand verbunden.

Sonnenreflexunterdrückende HUD-Abdeckung

Eine entwickelte Möglichkeit zur Minderung von Sonnenlichtreflektionen besteht in der Integration eines linearen Polarisationsfilters und einer $\lambda/4$ -Verzögerungsfolie in die HUD-Abdeckung. Das Konzept wurde als Patententwurf beim Deutschen Patentamt eingereicht [39]. In Abb. 5.53 ist die Funktionsweise des Systems veranschaulicht. Das Display strahlt dabei in zirkularer Polarisation ab. Nach dem Durchgang durch die Verzögerungsfolie ist das Licht linear polarisiert und kann den Polarisationsfilter ungehindert passieren. Die beiden Schichten können frei gewählt werden, um eine beliebige Orientierung der linearen Polarisation an der Frontscheibe zu erreichen. Das Konzept ist dadurch mit dem untersuchten Ansatz zur Doppelbildreduktion aus Kap. 5.5.2 kombinierbar.

Die Funktionsweise der Abdeckung zur Unterdrückung der Sonnenlichtreflektionen auf dem Display ist in Abb. 5.54 veranschaulicht. Eingestrahktes Sonnenlicht ist zunächst unpolarisiert und wird erst beim ersten Durchgang durch den Polarisationsfilter linear polarisiert. Dieses linear polarisierte Licht wird in der Verzögerungsschicht (Retarder) zirkular polarisiert und trifft dann auf die Displayfläche.

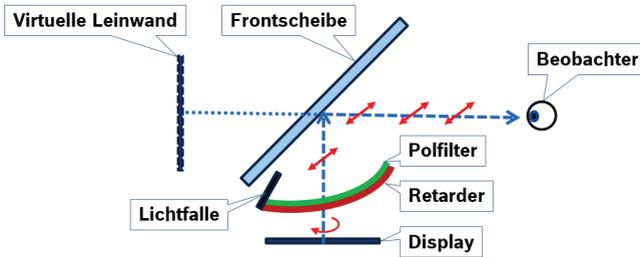


Abbildung 5.53: Funktionsweise des Konzepts zur Sonnenlichtunterdrückung mit einer in die Abdeckung integrierten Polarisations- und Retarderfolie. Das Display strahlt zirkular ab, sodass das Licht nach der Retarderfolie linear polarisiert ist und den Polarisationsfilter passieren kann.

Bei der Reflektion auf der Displayfläche wird durch den Phasensprung die Richtung der zirkularen Polarisation umgedreht. Nach einem weiteren Durchgang durch die Verzögerungsschicht ist das Sonnenlicht erneut linear polarisiert. Die lineare Polarisation ist jetzt gekreuzt zur Durchlassrichtung des Polarisationsfilters, wodurch das Sonnenlicht herausgefiltert wird.

Für ein solches System konnte bereits in einer sequentiellen Simulation eine effektive Abschwächung der Reflektionen bei Einsatz eines einschichtigen Retarders nachgewiesen werden. Um die Unterdrückung der Sonnenlichtreflektionen mit realen, breitbandigen Folien zu testen, wurde ein Experiment nach Abb. 5.55 aufgebaut.

Die Emitterfläche einer LED wurde über die der HUD-Abdeckung entsprechenden Filterstufen auf einen Schirm abgebildet. Der reflektierende Spiegel repräsentiert die Oberfläche des Displays, an der der Phasensprung zur Umkehr der zirkularen Polarisationsrichtung stattfindet. Untersucht wurde die verbleibende Intensität des abgebildeten

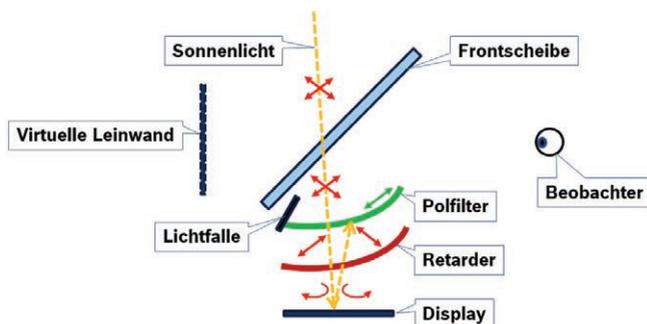


Abbildung 5.54: Funktionsweise der Ausfilterung der Sonnenreflektionen im System mit in die Abdeckung integrierter Polarisations- und Retarderfolie. Eintreffende, unpolarisierte Strahlen werden durch den Linearfilter polarisiert. Nach dem ersten Durchgang durch den Retarder stellt sich eine zirkulare Polarisation ein, deren Zirkulationsrichtung sich durch die Reflexion an der Oberfläche des Displays umkehrt. Nach einem weiteren Durchgang durch den Retarder ist das Licht gekreuzt zur Durchlassrichtung des Filters linear polarisiert und wird absorbiert.

Emitters im Vergleich zum System ohne Retarder. Der Retarder selbst weist eine Transmission $> 90\%$ auf [113].

Zur Evaluation der Winkelabhängigkeit der Verzögerungsfolie wurde diese um ihr Zentrum gedreht und die Messung bei verschiedenen Stellungen vorgenommen. Abb. 5.56 zeigt das Ergebnis der Untersuchung. Die Intensität der Reflexion wird unter Winkeln bis 20° auf unter $1,5\%$ reduziert.

5.5.4 HINTERLEUCHTUNG

Das in prototypischen Aufbauten verwendete Display der Firma *Seefront* besitzt eine Hinterleuchtung, durch die der Bildinhalt in einen

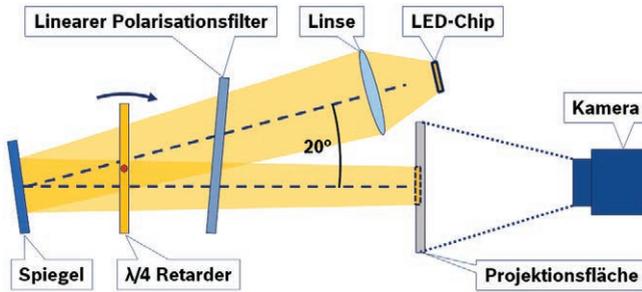


Abbildung 5.55: Versuchsaufbau zur Sonnenlichtreflexminderung mittels einem linearen Polarisationsfilter und einer $\lambda/4$ -Verzögerungsfolie. Die Emitterfläche einer LED wird über eine Projektionslinse auf eine transmissive Projektionsfläche abgebildet. Das Licht durchläuft dabei den linearen Polarisationsfilter, wird durch den Retarder zirkular polarisiert, am Spiegel reflektiert und durchläuft erneut den Retarder. Aufgrund des Phasensprungs bei der Reflexion stellt sich nach dem Retarder eine lineare Polarisation senkrecht zur Durchlassrichtung des Polarisationsfilters ein und das Licht wird ausgefiltert.

breiten Raumwinkel gestrahlt wird. Da die auszuleuchtende Gesamteyebow im HUD-System nur einen geringen Teil dieses Raumwinkels einnimmt, kann die Effizienz des Systems durch eine gerichteterere Hinterleuchtung wesentlich erhöht werden.

Bei Verwendung der ursprünglichen Hinterleuchtung wird die Bildhelligkeit durch die Einspiegelung über die Frontscheibe reduziert und es können nur geringe Leuchtdichten realisiert werden. Um im prototypischen Aufbau höhere Helligkeiten erzielen zu können, wurde eine Hinterleuchtung entworfen, die durch den Einsatz einer Matrixhinterleuchtung von 7×11 LEDs des Typs *Oslon LUW CN7N* der Firma *Osram* höhere Leuchtdichten erzielen soll. Es handelt sich dabei nicht um ein hinsichtlich der Effizienz optimiertes System.

Die LEDs erreichen bei einem Strom von 350 mA jeweils einen Lichtstrom zwischen 71 lm und 130 lm [114]. Die simulativ bestimmte

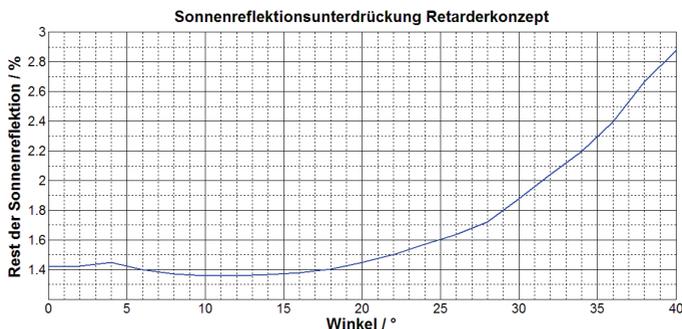


Abbildung 5.56: Messergebnis des Versuchsaufbaus nach Abb. 5.55. Die gemessene Intensität des auf den Schirm gelangenden Lichts im Vergleich zum System ohne Retarder beträgt in einem Winkelbereich bis 20° noch unter 2%. Der erste Knick in der Kurve entstand durch eine über den Schirm wandernde, geringe Doppelreflektion.

Ausleuchtung einer Displayfläche in einem Abstand von 4 cm zur LED-Matrix ist in Abb. 5.57 dargestellt. Dabei befindet sich direkt vor der Displayfläche eine homogenisierend wirkende Streufläche mit einem Streuwinkel von 40° .

Die Displayfläche wird homogen ausgeleuchtet. Erkennbar ist auch die durch die Einspiegelung über die Frontscheibe entstehende Verzerrung des Bildes, die durch Warping des Bildinhalts ausgeglichen werden kann.

5.5.5 FRONTSCHIEBEN-DEMONSTRATOR

Um experimentelle Untersuchungen am anwendungsnahen System durchführen zu können, wurde ein Frontscheiben-Demonstrator aufgebaut, bei dem eine Scheibe mit realer Frontscheibenform und ein auf Lentikularlinsen basierendes Display der Firma *Seefront* verwendet wurden. Das Display liefert eine native Auflösung von

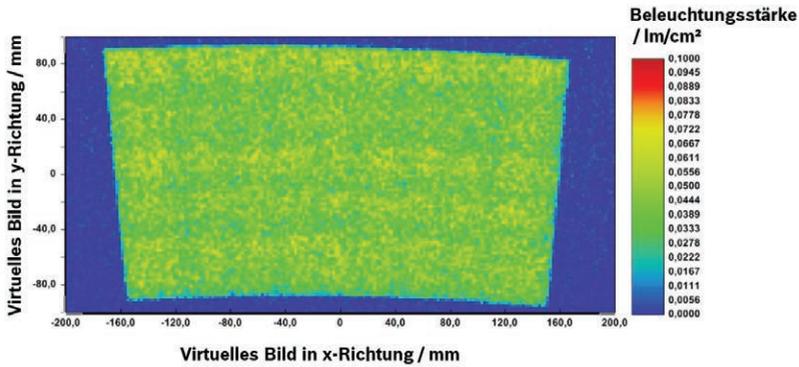


Abbildung 5.57: Simulierte Helligkeitsverteilung im virtuellen Bild bei Einsatz einer LED-Matrixhinterleuchtung aus 7×11 LEDs und einer 40° streuenden Streufläche. Es ergibt sich eine homogene Ausleuchtung. Die durch die Einspiegelung über die Frontscheibe verursachte Verzerrung des Bildes ist erkennbar.

2560 \times 1440 Bildpunkten (16 : 9) bei einer Größe von 294 mm \times 165 mm [115]. Zur Unterdrückung der Sonnenreflektionen wurde eine Glare Trap nach dem in Kap. 5.5.3 vorgestellten Konzept designet und mit einer laminierten Kombination aus einem Polarisationsfilter und einer Verzögerungsfolie aufgebaut. Der Aufbau des Systems ist in Abb. 5.58 dargestellt.

Der linke Teil der Abbildung zeigt das CAD-Modell der für das System ausgelegten Abdeckung. Die simulierten, aus der Gesamteyebow stammenden Strahlen werden vollständig zur Lichtfalle hin umgelenkt. Rechts dargestellt ist ein mechanischer Aufbau zur Realisierung des Konzepts im Frontscheiben-Demonstrator.

Die optischen Parameter des Systems finden sich in Tab. 5.10. Im Prototypen wird ein Teilbereich von 288 mm \times 126 mm des

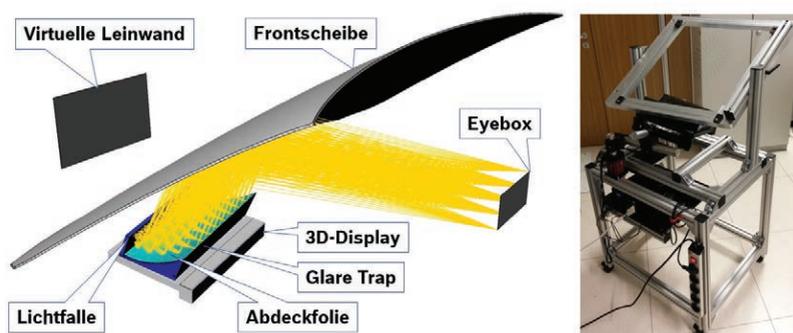


Abbildung 5.58: Links: HUD-System mit direkt eingespiegelmtem Display. Dargestellt ist die Funktionsweise einer ausgelegten Glare Trap zur Vermeidung von Sonnenlichtreflexionen (vgl. Abb. 5.30 auf S. 150 und Abb. 5.54). Rechts: Abbildung eines aufgebauten Frontscheibendemonstrators. Die Bildrechte liegen bei der Robert Bosch GmbH. Die Konstruktion und Realisierung des Gestells fand außerhalb dieser Arbeit als Teil einer bei Bosch durchgeführten Konzeptstudie statt [93, 99].

13,3"-Displays genutzt, um auf 15 m ein Blickfeld von $9^\circ \times 4^\circ$ zu realisieren (siehe Kapitel 3.2).

Die Zusammenfassung einiger Messwerte des Frontscheibendemonstrators findet sich in Tab. 5.11. Bei einer ersten Messung des Doppelbildkontrasts wurde eine von der Firma *Flabeg* hergestellte Frontscheibe verwendet, die außenseitig entspiegelt und innenseitig mit einer Verspiegelung von 30% in s-Polarisation versehen wurde. Die Abstrahlung des Displays wurde durch eine $\lambda/2$ -Retarderfolie angepasst, um p- bzw. s-Polarisation zu erhalten. Mit 9,6 : 1 fällt der Doppelbildkontrast in s-Polarisation etwas höher aus als in p-Polarisation.

In einer zweiten Messung wurde ein ebenfalls von der Firma *Flabeg* hergestelltes, planes Scheibensample als Frontscheibenersatz verwendet, bei dem eine $\lambda/2$ -Retarderfolie zwischen zwei Glasplatten

einlaminiert wurde. Durch die Phasendrehung in der Retarderschicht wird der Doppelbildkontrast deutlich erhöht (vgl. Prinzip in Abb. 5.51, S. 179).

Parameter	Wert	Beschreibung
Scheibe	gekrümmt	reale Frontscheibenform
VSD	1 m	Virtuelle Leinwanddistanz
FOV 1 m	$16,4^\circ \times 7,2^\circ$	Field of View auf 1 m
FOV 15 m	$9^\circ \times 4^\circ$	Field of View auf 15 m
EB	140 mm \times 60 mm	Gesamteyeboxgröße
Display	288 mm \times 126 mm	genutzte Displaygröße

Tabelle 5.10: Optische Parameter des Frontscheiben-Demonstrators aus Abb. 5.58.

In einer dritten Messung wurde die Reduktion blendender Sonnenreflektionen mit Hilfe der Glare Trap untersucht (vgl. Prinzip in Abb. 5.54, S. 185). Dazu wurde ein Papierschirm mit weißem LED-Licht beleuchtet und aus einer Position über der Frontscheibe eingespiegelt. Es wurde dabei erneut die Frontscheibe mit 30% Verspiegelung in s-Polarisation verwendet. Die Minderung der Reflektion wurde aus einem Vergleich der Leuchtdichte des eingespiegelten Papierschirms mit und ohne eingesetzter Glare Trap bestimmt. Durch die Glare Trap wurde dabei die Leuchtdichte auf 0,12% des ursprünglichen Werts verringert.

Die Unterdrückung ist deutlich stärker als im experimentellen Aufbau aus Abb. 5.55, S. 186, da das Restlicht der Reflektion durch die Glare Trap in p-Polarisation gefiltert wird. Diese Polarisation erfährt an der Frontscheibe gegenüber unpolarisiertem Licht eine geringe Reflektion.

Frontscheibe mit 30 % Verspiegelung in s-Pol		
DB-Kontrast p-Pol	8,3 : 1	Doppelbildkontrast p-Polarisation
DB-Kontrast s-Pol	9,6 : 1	Doppelbildkontrast s-Polarisation
Scheibensample mit $\lambda/2$-Retarder		
DB-Kontrast p-Pol	15,9 : 1	Doppelbildkontrast p-Polarisation
DB-Kontrast s-Pol	25,3 : 1	Doppelbildkontrast s-Polarisation
Sonnenreflektionsminderung durch Glare Trap (GT)		
Reflexminderung	0,12 %	Restintensität Sonnenreflektion mit GT
Bildverdunklung	15,9 %	Verdunklung durch GT in p-Polarisation

Tabelle 5.11: Übersicht über einige Messwerte des Frontscheiben-Demonstrators mit Lentikularlinsenansatz.

Es ist zu berücksichtigen, dass aufgrund der Transmissionseigenschaften der in der Glare Trap eingesetzten Folien eine Reduktion der Helligkeit der Anzeige auftritt. Nach Herstellerangaben des in der Glare Trap verwendeten Polarisationsfilters liegt die Transmission bei 84 % [116], was mit den Messdaten übereinstimmt. In laminiertes Form wird die Transmission durch den Retarder nur unwesentlich verringert.

Zur messtechnischen Bestimmung wurde das System ohne Glare Trap unter Einsatz einer $\lambda/2$ -Retarderfolie auf der Displayfläche auf p-Polarisation angepasst und die Leuchtdichte der Anzeige gemessen. Diese Leuchtdichte wurde verglichen mit dem System mit eingesetzter Glare Trap, wobei die Abstrahlung des Displays durch eine $\lambda/4$ -Retarderfolie angepasst wurde, um maximale Transmission durch die Glare Trap zu erreichen (vgl. Abb. 5.53, S. 184). Durch den Polarisationsfilter der Glare Trap ist das Licht an der Frontscheibe ebenfalls p-polarisiert. Im Systemvergleich verdunkelte sich das Bild um 15,9 %.

5.6 FAZIT

Die untersuchten und in mehreren Prototypen umgesetzten Strahlteilerkonzepte mit zwei LCD-Zellen bieten eine hohe Auflösung bei guter Bildqualität und eignen sich daher für die Untersuchungen der 3D-Wahrnehmung in anwendungsnahen Systemen. Die verwendeten Komponenten sind in automotivetauglichen Ausführungen erhältlich und werden bereits in konventionellen Systemen eingesetzt. Im Bosch Projekt „*Autostereoskopisches HUD*“ wurden die designten und realisierten Systeme daher eingesetzt, um das Potential der 3D-Technologie im HUD-System in Nutzerstudien zu evaluieren und um eine Plattform zur Demonstration der Funktionalität zu bieten.

Gegen eine Serienentwicklung dieses Konzepts sprechen die hohen Kosten für die beiden LCD-Zellen mit entsprechender Hinterleuchtung, sowie der große notwendige Bauraum der getrennten Zweige der Bildgebereinheit mit entsprechender Strahlteilerlösung.

Zeitsequentielle Lösungen mit einem Umschalten der Hinterleuchtung einer einzelnen LCD-Zelle für die Realisierung der beiden schmalen Eyeboxen führen zu Problemen der Bildfrequenz, bedingt durch die langsamen Schaltzeiten von LCD-Zellen bei niedrigen Temperaturen.

Der als eine Möglichkeit zur 3D-Darstellung mit nur einer LCD-Zelle untersuchte Ansatz der Direkteinspiegelung eines auf Lentikularlinsen basierenden Displays bietet eine räumliche Trennung der zu den beiden Teilbildern beitragenden Displaypixel. Die Auflösung des von einem Auge wahrgenommenen Bildes wird durch die Aufteilung der Pixel reduziert. Der Technologietrend in LCD-Zellen geht allerdings hin zu höheren Auflösungen, durch die der Auflösungsverlust kompensiert werden kann.

Die rein elektronische Nachführung der Pixelzuordnung vermeidet eine mechanische Latenzzeit und macht das System reaktionsschnell

und robust gegenüber schnellen Kopfbewegungen des Nutzers. Die direkte Einspiegelung eines großen Displays ermöglicht zudem die Realisierung eines breiten Blickfelds bei geringem Bauraum.

Die virtuelle Leinwanddistanz im Bereich von etwa 1 m fällt bei diesem Konzept gering aus und erschwert das Umfokussieren zwischen der Fahrscene und dem dargestellten, virtuellen Bildinhalt. Im System auftretende Doppelbilder werden reduziert, können aber nicht mit dem eigentlichen Bild überlagert werden, wodurch ein gewisser Doppelbildkontrast bestehen bleibt. Vorteilhafterweise muss die Frontscheibe nicht mehr auf das einzelne HUD angepasst werden und kann bei Systemen mit verschiedenen virtuellen Leinwanddistanzen eingesetzt werden.

Die direkte Einspiegelung des Displays öffnet optische Pfade für blendende Sonnenlichtreflektionen, die durch die Systemgeometrie anders als bei alternativen Konzepten nicht vollständig vermieden, aber bis zu einem gewissen Grad unterdrückt werden können.

KAPITEL 6

SONDERKONZEPTE

In diesem Kapitel werden zwei sich von den bisherigen Konzepten im Systemaufbau grundlegend unterscheidende Konzepte vorgestellt. Im ersten Abschnitt wird ein Ansatz untersucht, bei dem ein Mikrodisplay unter hoher Vergrößerung direkt auf die virtuelle Leinwand abgebildet wird. Als ein zweiter Ansatz wird ein volumetrisches System mit variabler Leinwanddistanz untersucht, das keine getrennten Teilbilder benötigt.

6.1 DIREKTABBILDENDES HUD MIT MIKRODISPLAY

Die in konventionellen Projektionskonzepten notwendige Projektionsfläche ist ein kritischer Faktor im HUD-System. Beispielsweise verringert die Streuung in ungenutzte Raumwinkelbereiche die Effizienz. Ebenso können durch die Projektionsfläche bedingte Kontrastverluste, sichtbare Strukturen oder Granulationen im Bild auftreten.

Ein in diesem Abschnitt untersuchter Ansatz verzichtet daher auf eine Projektionsfläche und bildet einen Imager direkt über einen Zwischenfokus ins virtuelle Bild ab.

Der Aufbau des Systems lässt sich als eine Integration des konventioneller Weise genutzten Projektorobjektivs in die HUD-Optik verstehen. Der Zwischenfokus in der Abbildungsoptik kann als ein vergrößertes Bild des Imagers betrachtet werden, das durch weitere Spiegel ins

virtuelle Bild abgebildet wird. Die Vergrößerung der zweiten Stufe ist dann vergleichbar mit der anderer HUD-Konzepte.

Auf Basis der Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Patente entwickelt und als Entwurf beim Deutschen Patentamt eingereicht [40, 41].

Als abzubildender Imager kann beispielsweise ein DLP- oder ein LCoS-Chip eingesetzt werden. Die Fokuswinkel der Bildpunkte im Zwischenfokus sind derart angepasst, dass die Anforderungen der Abstrahlbedingungen für die folgende Abbildungsoptik erfüllt sind. Die Zwischenfoki der einzelnen Bildpunkte müssen nicht in einer Ebene liegen, sondern können im Raum verteilt sein, da am Zwischenbild keine Projektionsfläche bespielt werden muss. Sie können sich außerdem astigmatisch über einen Bereich erstrecken. Dies führt zu zusätzlichen Freiheitsgraden bei der Optimierung des Gesamtsystems. Durch den Verzicht auf die Projektionsfläche werden Auflösungs- und Kontrastverluste vermieden. Da die Abbildungsoptik durchgehend auf Spiegeln basiert, entstehen keine chromatischen Aberrationen. Durch die Verwendung von schnellen Imagern kann der Bildaufbau zeitsequentiell in den verschiedenen Farben erfolgen und es werden keine Farbfilter benötigt, die die Systemeffizienz verringern. Durch die hohe Schaltgeschwindigkeit eines DLP-Chips wird zusätzlich zum zeitsequentiellen Umschalten für den Farbbildaufbau ein weiteres, zeitsequentielles Umschalten zwischen den beiden Bildinhalten für linkes und rechtes Auge ermöglicht (Bildaufbau mit z.B. 120 Hz). Aktuell erhältliche LCoS-Systeme erlauben eine Bildwiederholrate von 120 Hz bei voller Farbtiefe, wodurch Stereobetrieb mit 60 Hz erreicht werden kann.

Stereofunktionalität ist dann mit nur einem einzelnen Imager möglich. Durch den kleinen, reflektiv arbeitenden Imager können Nachführkonzepte als eine Drehung des kleinen Imagers realisiert werden,

ohne dass große Massen bewegt werden müssen, die die mechanische Latenzzeit erhöhen.

Eine Herausforderung des Systems ist die rückwärtige Sonneneinstrahlung, die aufgrund der hohen Vergrößerung der Abbildungsoptik auf dem Imager gesammelt wird und zu einer starken Erhitzung führt. Da die vorgeschlagenen Imager reflektiv arbeiten, sind diese für eine rückseitige Kühlung zugänglich. Insbesondere die Verwendung eines DLP-Chips ermöglicht zudem den Einsatz in einem hohen Temperaturbereich.

6.1.1 SIMULATIVE AUSLEGUNG

Abb. 6.1 zeigt ein ausgelegtes System, bei dem ein 1"-Imager über vier Freiformspiegel und die Frontscheibe ins virtuelle Bild abgebildet wird. Der Lichtweg der Simulation wird dabei invers und beginnend am virtuellen Bild berechnet. Einige Eckdaten des Systems finden sich in Tab. 6.1.

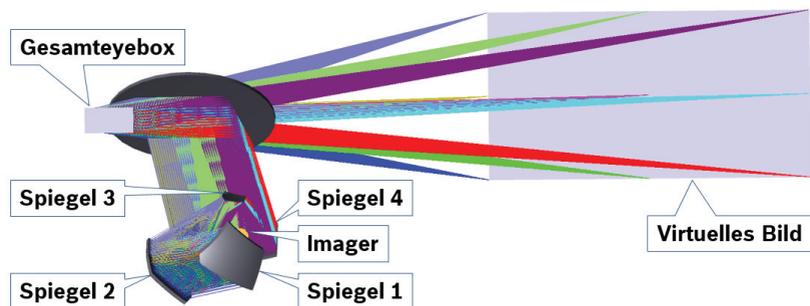


Abbildung 6.1: Simulation eines HUD-Designansatzes mit direktabbildendem HUD. Das System ist zunächst nicht auf einen speziellen Bauraum angepasst.

Parameter	Wert	Beschreibung
VID	5 m	Virtuelle Leinwanddistanz
FOV	$9^\circ \times 4,5^\circ$	Field of View
EB	120 mm \times 60 mm	Eyeboxgröße
Chip	1"	Imager Diagonale

Tabelle 6.1: HUD-Parameter des Designs aus Abb. 6.1.

Um ein mit anderen Systemen vergleichbares Blickfeld in 5 m Abstand zu erreichen, ist eine hohe Gesamtvergrößerung erforderlich. Durch die Verwendung von vier Freiformspiegeln kann diese Anforderung unter Einhaltung einer hohen Abbildungsqualität erfüllt werden.

Das Design aus Abb. 6.1 erreicht bei einer Apertur von 8 mm eine durchschnittliche Spotgröße von $9,45 \mu\text{m}$. Die Apertur entspricht dabei dem Durchmesser eines angenommenen Betrachterauges innerhalb der Gesamteyebox und die Spotgrößen beziehen sich auf die Abbildung auf die Fläche des Imagers. Ziel ist dabei das Erreichen einer Spotgröße in der Größenordnung der Pixel des Displays ($10 \mu\text{m}$ beim DLP-Chip). Abb. 6.2 zeigt eine Berechnung der Spotgrößen aus verschiedenen Positionen innerhalb der Eyebox, die mit Hilfe eines von *Bosch Car Multimedia* entwickelten Matlab-Tools berechnet wurden [98]. Wie in der Abbildung erkennbar, liegen die Spotgrößen in allen Eyeboxpositionen im Zielbereich.

Wird ein DLP-Chip als Imager eingesetzt, so muss der komplette Lichtkegel des Nutzlichts in eine Lichtfalle ablenkbar sein. Abb. 6.3 veranschaulicht die Reflektion an einem Imager, dessen Spiegel wie bei konventionellen DLP-Chips um $\pm 12^\circ$ umklappen können. Der Kegel wird dann um 48° umgelenkt. Das bedeutet, dass die Öffnungsbreite des gesamten Nutzlichts maximal 48° betragen darf, um komplett in

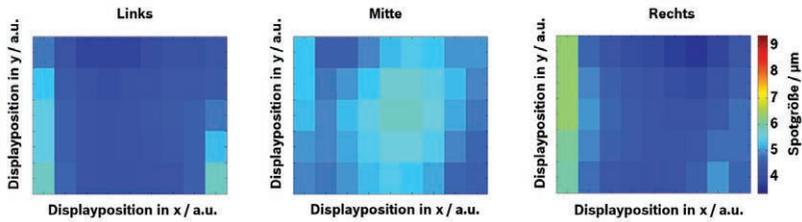


Abbildung 6.2: Simulation der zu erwartenden Spotgrößen des Designs aus Abb. 6.1 aus dem Zentrum und den horizontalen Rändern der Gesamteyebbox heraus. Die Systemapertur betrug dazu jeweils 8 mm. Das optische Design wurde dazu mit einem Tool des Geschäftsbereichs *Bosch Car Multimedia* ausgewertet [98].

die Lichtfalle geleitet werden zu können. Die gleiche Bedingung gilt auch beispielsweise bei Einsatz eines TIR-Prismas.

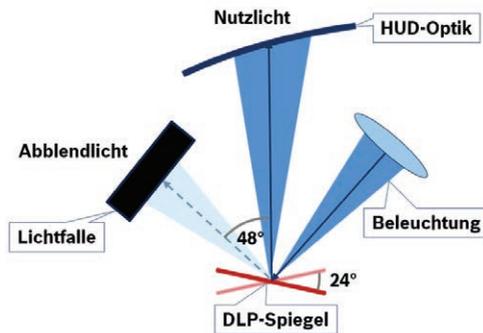


Abbildung 6.3: Beleuchtungsprinzip eines DLP-Imagers im HUD-Konzept. Bei einem um 24° klappendem Spiegel wird der Lichtkegel um 48° umgelenkt. Das komplette Licht der Beleuchtung muss dann in die Lichtfalle geleitet werden können.

Eine grundlegende Überprüfung der Machbarkeit eines solchen Konzepts lässt sich in paraxialer Näherung über die Helmholtz-

LaGrange-Invariante berechnen, nach der das Produkt aus Strahlwinkel und Brechungsindex konstant bleibt. Es gilt dann folgender Zusammenhang [117]:

$$n \cdot y \cdot \sigma = n' \cdot y' \cdot \sigma' \quad (6.1)$$

Darin sind n bzw. n' objekt- und bildseitiger Brechungsindex, y bzw. y' die jeweilige Gegenstandsgröße und σ bzw. σ' die Strahlneigung. Aus den Daten aus Tab. 6.1 ergibt sich nach Gl. 6.1 ein voller Öffnungswinkel von $48,1^\circ$ in der Horizontalen und $11,3^\circ$ in der Vertikalen. Ein Umklappen des Lichtkegels ist in dieser Näherung damit zwar in der Horizontalen nicht möglich, allerdings kann über die vertikale Richtung oder je nach Design auch über die Diagonale umgeklappt werden, wie es bei DLP-Chips in der sog. Orthogonalstruktur der Fall ist. Auf eine entsprechende Formung des Lichtkegels ist im nicht paraxialen System der HUD-Abbildungsoptik zu achten.

Da im autostereoskopischen Aufbau nicht die komplette Gesamteyebbox ausgeleuchtet werden muss, sondern zwei schmale Eyebboxes, verringert sich der Öffnungswinkel des gesamten Nutzlichts und erleichtert das Ablenden über einen DLP-Chip. Durch den Zwischenfokus können die äußeren Strahlwinkel am Rand des Imagers nach innen gerichtet werden, wodurch sich das am Imager abstrahlende Lichtbündel verschlankt und sich die Aperturen der nachfolgenden Optiken verkleinern.

In Abb. 6.4 ist das optische Design eines direktabbildenden Konzepts dargestellt, das an einen im Rahmen des Bosch Projekts *Autostereoskopisches HUD* definierten Bauraum [97] angepasst wurde. Die Eckdaten stimmen mit denen aus Tab. 6.1 überein, mit dem einzigen Unterschied, dass das System auf einen $0,88''$ -Imager als eine typische LCoS-Größe ausgelegt wurde. Durch das Zusammenfallen des

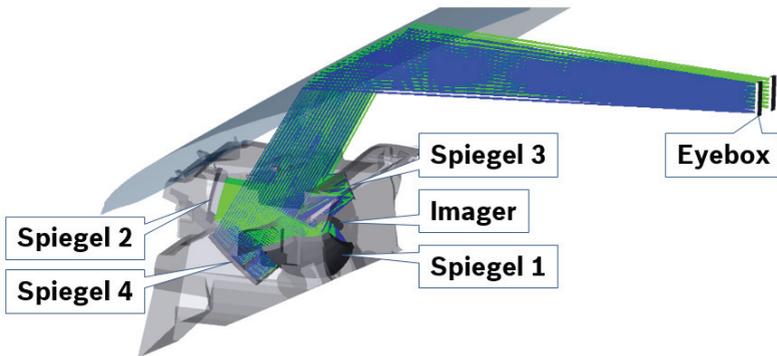


Abbildung 6.4: Simulation eines HUD-Designansatzes mit direkter Abbildung eines LCoS-Chips. Das System ist auf einen typischen, zur Verfügung stehenden Bauraum angepasst. Das Bauraumvolumen stammt aus dem Bosch Projekt *Autostereoskopisches HUD* [97].

Lichtwegs über die vier Spiegel wird gezeigt, dass das System an typische Bauräume angepasst werden kann. In Abb. 6.5 ist der mittels einer CAD-Konstruktion angepasste Bauraum des HUDs dargestellt. Der Bauraum endet an der Oberkante des Armaturenbretts und beträgt ca. 10l.

Für das Design aus Abb. 6.4 wurde außerdem eine Toleranzuntersuchung bezüglich der Einbaulagen der verschiedenen optischen Elemente durchgeführt. Dabei wurde für die vier verwendeten Spiegel und den Bildgeberchip, sowie für die Windschutzscheibe jeweils eine definierte Lagetoleranz simuliert. Die Elemente wurden dabei um $\pm 0,2^\circ$ um die lokale x- und y-Achse verkippt und außerdem um $\pm 0,2$ mm dezentriert.

Die Abstände zwischen den einzelnen Elementen wurden ebenfalls um $\pm 0,2$ mm variiert. Untersucht wurde die Spotgröße der Abbildung der Feldpunkte im virtuellen Bild auf den Bildgeberchip

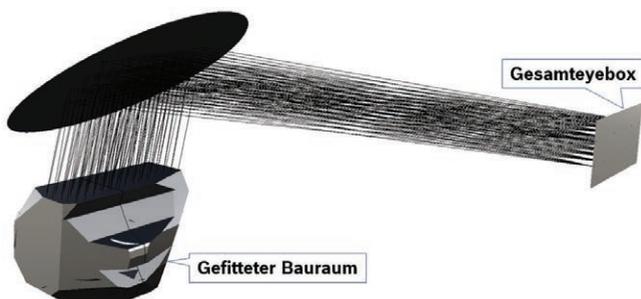


Abbildung 6.5: Benötigtes Bauraumvolumen des Designs aus Abb. 6.4. Der benötigte Bauraum wurde mittels einer CAD-Software angepasst und umfasst ca. 10l.

bei einer Systemapertur von 8 mm. Die Vergrößerung der Spotgröße ist dabei ein Maß für den Auflösungsverlust durch die Lagetoleranzen.

Die nominelle Spotgröße bei ideal ausgerichteten und positionierten Optiken entsprach in der Simulation $14 \mu\text{m}$. Dabei wird von einer flachen virtuellen Leinwand ausgegangen, ohne Berücksichtigung der sich ergebenden kleineren Spotgrößen beim Zulassen einer Wölbung im virtuellen Bild. Das Ergebnis einer Monte Carlo Simulation, die 1000 verschiedene Variationen des Designs simuliert, war, dass 98 % der Designs eine Spotgröße von unter $23,4 \mu\text{m}$ erreichten. Diese Verschlechterung liegt, trotz der hohen Vergrößerung der Optik von 37,5 in der Horizontalen und 32,5 in der Vertikalen im typischen, bei HUDs simulierten Bereich. In Tab. 6.2 sind einige Kenngrößen der Toleranzanalyse bezüglich der Spotgröße angegeben.

Empfindlichste Toleranzen		
Element	Verschiebung	Spotvergrößerung
1. Spiegel	y-Verkipfung $0,2^\circ$	$+4,8 \mu\text{m}$
1. Spiegel	x-Verkipfung $-0,2^\circ$	$+4,5 \mu\text{m}$
4. Spiegel	x-Verkipfung $-0,2^\circ$	$+4,2 \mu\text{m}$
3. Spiegel	y-Verkipfung $-0,2^\circ$	$+4,1 \mu\text{m}$
Display	x-Decenter $-0,2 \text{ mm}$	$+2,2 \mu\text{m}$

Spotgrößen	
Spot Size	Beschreibung
$14 \mu\text{m}$	Nominell
$21 \mu\text{m}$	Geschätzte Erwartung nach RMS-Methode
$23,5 \mu\text{m}$	Grenze für 98 % der Designs

Tabelle 6.2: Einige Kenngrößen der Toleranzanalyse für das Design aus Abb. 6.4.

6.1.2 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG

DLP-Labora Aufbau

Um grundlegende optische Laborversuche an einem DLP-Chip vornehmen zu können, wurde ein DLP-Beamer des Typs *BenQ W1070* zerlegt und dessen $0,95''$ -Chip zugänglich gemacht.

Die Hinterleuchtung eines DLP-Chips als Mikrodisplay kann zweistufig realisiert werden [118]. Um die benötigte Abstrahlcharakteristik am selbst nicht streuenden DLP-Chip zu erreichen, wurde ein Hinterleuchtungskonzept verwendet, dessen schematischer Aufbau in Abb. 6.6 vereinfacht dargestellt ist. Hierbei wird das Licht einer LED kollimiert und auf ein Mikrolinsenarray gestrahlt. Die einzelnen Mikrolinsen bilden Lichtkanäle, welche umgelenkt durch die nachfolgende Linse jeweils die gesamte Streufläche beleuchten. Die Überlagerung der einzelnen Kanäle ergibt eine homogene Ausleuchtung.

Von der Streufläche der Hinterleuchtung selbst treten Punktlichtquellen aus, welche auf die Fläche des Imagers abgebildet werden. Die Breite der Abstrahlkegel kann über die Apertur der abbildenden Linse eingestellt werden. Im realen Aufbau wird statt der abbildenden Linse ein Hohlspiegel verwendet, um die Apertur zu vergrößern. Da es sich um eine Hinterleuchtung handelt, muss die Streufläche nicht scharf abgebildet werden. Aberrationen müssen daher nicht eliminiert werden und durch die Unschärfe der Abbildung wird eventuelle, durch die Streufläche verursachte Granulation vermieden.

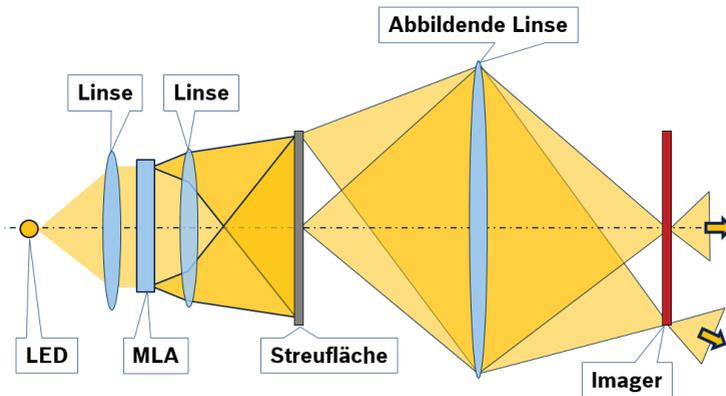


Abbildung 6.6: Beleuchtungskonzept eines direkt abgebildeten Imagers. Da der Imager selbst nicht streut, wird eine Streufläche über eine Linse auf den Imager abgebildet, dessen Pixel dann in die benötigten Raumrichtungen strahlen.

Zur Untersuchung des Bildeindrucks wurde der hinterleuchtete DLP-Chip mit Hilfe eines Freiformspiegels um etwa den Faktor 5 vergrößert, virtuell abgebildet und das virtuelle Bild charakterisiert. In Tab. 6.3 sind die grundlegenden Messwerte zusammengefasst. Das Konzept erreicht dabei einen hohen Kontrast und zeigt homogene Strukturen mit geringer Granulation. Störend sind allerdings

Farbeffekte, die aufgrund von Beugungseffekten bei der Beleuchtung mittels einer weißen LED entstehen.

Abb. 6.7 zeigt dazu den Vergleich des virtuellen Bildeindrucks bei Hinterleuchtung mit einer grünen und einer weißen, phosphorkonvertierten LED. Dargestellt ist jeweils ein weißes Testbild mit 9 schwarzen Quadraten. Im sequentiellen Bildaufbau mit RGB-Hinterleuchtung und engeren Farbspektren können diese Effekte reduziert werden. Die Beugung am Chip führt allerdings auch zu höheren Beugungsordnungen der entstehenden Eyebox, welche deutlich sichtbares Übersprechen erzeugen. Da die Beugungsordnungen in Richtung der Kanten der DLP-Spiegel entstehen, können diese aus dem Bereich des anderen Auges gelenkt werden, indem ein DLP-Chip mit um 45° gedrehten Spiegeln verwendet wird (Orthogonalstruktur).

Messwerte DLP-Labora Aufbau	
SW-Kontrast	> 1000 : 1
Homogenität	1,7
Granulation	1,45 %

Tabelle 6.3: Übersicht über einige Messwerte eines Laboraufbaus zur Untersuchung des direktabbildenden Konzepts mit DLP-Imager.

Ein entwickelter Ansatz zur Unterdrückung von Übersprechen liegt in der räumlichen Trennung der optischen Lichtpfade für linkes und rechtes Auge im optischen Design der Abbildungsoptik. Werden die beiden Teilbilder mit unterschiedlicher Lichtpolarisation erzeugt, so kann das jeweils unerwünschte Teilbild durch Polarisationsfilter unterdrückt werden. Beim Nachführen der Kopfposition müssen diese eingebrachten Filter ebenfalls linear mit nachgeführt werden.

Das Prinzip kann alternativ über eine Wellenlängenselektion der beiden Teilbilder umgesetzt werden, wobei die Grundfarben der

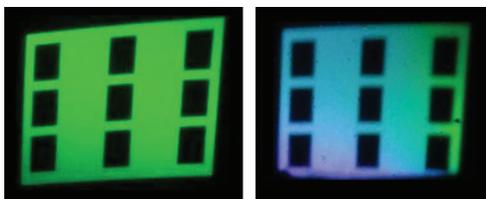


Abbildung 6.7: Links: Virtuelles Bild des Laboraufbaus zur Untersuchung der direkten Abbildung eines DLP-Chips über einen Freiformspiegel. Die Beleuchtung erfolgt über eine grüne LED. Rechts: Beleuchtung mittels einer weißen LED. Es treten durch die Beugung an der DLP-Matrix bedingte Farbfehler auf.

Teilbilder in gegeneinander verschobenen Wellenlängen realisiert werden. Für die entwickelten Ansätze wurde ein Patententwurf beim Deutschen Patentamt eingereicht [41].

LCoS-Laboraufbau

Die Verwendung eines LCoS-Chips als Imager löst die Problematik des räumlichen Abblendwinkels eines DLP-Chips, da er keine Lichtfalle benötigt und über einen Strahlteiler beleuchtet werden kann [119, 120]. Analog zum zuvor beschriebenen Laboraufbau wurde für den Ansatz des direktabbildenden HUDs auf LCoS-Basis ein Beamer des Typs *DLA-X35WE* der Firma *JVC* zerlegt, um einen der drei darin enthaltenen 0,7"-LCoS-Chips mit eigener LED-Beleuchtung nach dem Schema in Abb. 6.6 zu versehen.

Zur Beleuchtung des Chips wurde ein polarisationsabhängiger Strahlteiler basierend auf Wire Grid-Technologie verwendet, der sich durch seine Funktionalität über große Winkel- und Spektralbereiche auszeichnet. Der LCoS-Chip wird anders als im ursprünglichen Projektorsystem aus einem verbreiterten Winkelbereich beleuchtet, so dass die einzelnen Pixel einen nutzbaren Eyeboxbereich ausleuchten.

Der Chip lässt eine Beleuchtung aus schrägen Winkeln prinzipiell zu [121]. Die Abbildung ins virtuelle Bild fand über denselben Freiformspiegel statt.

In Tab. 6.4 sind grundlegende Messwerte des Konzepts aufgelistet. Die Charakterisierung liefert verglichen mit dem DLP-Aufbau ähnlich gute Messwerte.

Da der LCoS-Imager im Gegensatz zum DLP-Imager keine beweglichen Mikrospiegel besitzt, ergeben sich Vorteile beim Füllfaktor der Pixel auf der Chipfläche. Der Imager kann außerdem nahezu On-Axis beleuchtet werden. Die im Aufbau beobachteten Beugungseffekte am LCoS-Chip sind daher wesentlich geringer als die des DLP-Versuchs. Mit bloßem Auge sind bei der Beleuchtung mittels der weißen LED keine Farbeffekte mehr erkennbar.

Messwerte LCoS-Labora Aufbau	
SW-Kontrast	> 1000 : 1
Homogenität	1,32
Granulation	1,77 %

Tabelle 6.4: Übersicht über einige Messwerte eines Laboraufbaus zur Untersuchung des direktabbildenden Konzepts mit LCoS-Imager.

6.2 VOLUMETRISCHES HUD

Verschiedene Tiefenebenen im HUD-System können in einem volumetrischen Ansatz dargestellt werden, indem das von der HUD-Optik abgebildete Display zum Brennpunkt der Optik hin und von ihm weg verschoben wird [122, 123]. Das HUD-System vergrößert das Display dann unterschiedlich und bildet in verschiedene Leinwanddistanzen

ab. Beispielsweise kann eine sich schnell bewegende Projektionsfläche auf diese Weise zeitsequentiell verschiedene Tiefenebenen im Raum aufbauen.

Bei einem solchen System wird ein Tiefeneindruck erzeugt, der der Wahrnehmung realer Objekte entspricht [124, 125]. Da sich die virtuelle Leinwandebene stets am Ort des jeweiligen Bildes befindet, gibt es keine Konflikte zwischen Akkommodation und Sehachsenkonvergenz der Augen. Es sind ebenfalls keine getrennten Teilbilder für linkes und rechtes Auge mehr erforderlich und es entsteht ein natürlicher Seheindruck.

Die Herausforderungen des Systems bestehen in der Realisierbarkeit entsprechender Optiken, die auch bei Einbindung einer realen Frontscheibe ausreichend tolerant für die Abbildung in verschiedene Leinwandabstände sind. Zudem muss der notwendige Hub der Displayebene realisierbar bleiben.

Das Konzept kann beispielsweise mit einer sich schnell bewegenden Projektionsfläche, wie sie mit der Projektion auf eine einem Lautsprecher ähnliche Membran realisiert werden kann, zeitsequentiell verschiedene Tiefenebenen im Raum aufbauen. Die Firma *Making Virtual Solid, L.L.C.* stellte beispielsweise ein ähnliches System zur Realisierung einer im Raum erscheinenden Linie durch eine Flying Spot Laserprojektion auf einer solchen Membran vor [126].

Aus der Literatur sind alternative Ansätze bekannt, bei denen die Projektionsfläche als eine sich drehende Helixschraube realisiert ist [122]. Das Projektionskonzept muss dazu eine ausreichende Tiefenschärfe aufweisen oder den Fokus beispielsweise durch Einsatz einer schnellen Flüssiglinse zeitsynchron nachführen.

Im Designschritt der Abbildungsoptik müssen beim volumetrischen HUD bereits die verschiedenen Systemzustände mit verschiedenen

Displaypositionen berücksichtigt werden, um eine ausreichende Abbildungsqualität zu gewährleisten. Dadurch wird sichergestellt, dass die Optik ausreichend tolerant für die Abbildung in verschiedene Leinwanddistanzen ist. Diese Anpassung wird insbesondere durch die Einbindung einer realen Frontscheibe herausfordernd, deren Form durch die abbildenden Spiegel kompensiert werden muss.

Für das Design der volumetrischen HUD-Ansätze wurde daher eine angepasste Optimierungsfunktion entwickelt, die insbesondere verschiedene Displaygrößen in den unterschiedenen Zuständen zulässt und mehrere Systemzustände gleichzeitig berücksichtigt, die sich gegeneinander gewichten lassen. Im Falle einer Projektionslösung kann der entsprechende Teil der Projektionsfläche in jedem Zustand genutzt werden. Der notwendige Hub der Displayebene lässt sich limitieren, um realisierbare Bereiche zu gewährleisten. Zur Generierung einer auf das jeweilige System angepassten Optimierungsfunktion wurde ein Makro im Simulationsprogramm *Zemax Optic Studio* erstellt.

Mit Hilfe der angepassten Optimierungsfunktion wurde das in Abb. 6.8 dargestellte Design entworfen, bei dem die Displayebene über drei Freiformspiegel und die Frontscheibe virtuell abgebildet wird. Die Auslegung der Optik erfolgte dabei auf Basis der inversen Abbildung vom virtuellen Bild auf das Display.

In Tab. 6.5 sind die grundlegenden Parameter der Abbildungsoptik angegeben. Ziel der Optimierung im inversen System war es, einen abbildbaren Tiefenbereich zwischen 5 m und 50 m zu erreichen. Der dazu freigegebene Hub der Displayebene beträgt 6,1 mm. Dabei bildet das System in Nullposition des Displays auf eine Leinwandebene in 5 m ab. Die Auslenkung des Displays erfolgt durch eine Vergrößerung der Distanz zum ersten Spiegel.

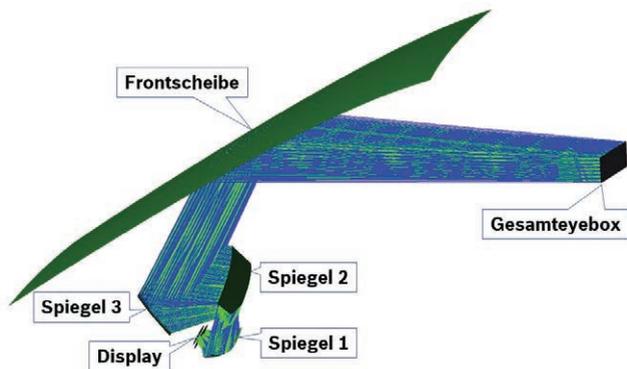


Abbildung 6.8: Optisches Design eines volumetrischen HUDs. Eine bewegliche Projektionsfläche wird dabei über drei Freiformspiegel und die Frontscheibe virtuell abgebildet. Die Parameter des Designs finden sich in Tab. 6.5.

Parameter	Wert	Beschreibung
VID	5 m bis 50 m	Virtuelle Leinwanddistanz
FOV	$10^\circ \times 3,5^\circ$	Field of View
EB	140 mm \times 50 mm	Eyeboxgröße
Max Hub	6,1 mm	Bewegungsspielraum des Displays

Tabelle 6.5: HUD-Parameter des Designs aus Abb. 6.8.

Die Position der Abbildungsebenen in der inversen Simulation bei verschiedenen Auslenkungen des Displays ist in Abb. 6.9 dargestellt. Der Abstand der Leinwand ist dabei nicht linear zum ausgelenkten Weg des Displays. Dieser Zusammenhang lässt sich bereits aus grundlegenden optischen Gleichungen folgern. Es gilt:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{g} \quad (6.2)$$

$$V = \frac{b}{g} \quad (6.3)$$

Darin sind f die Brennweite einer abbildenden Linse, b die Bildweite, g die Gegenstandsweite und V die Vergrößerung der Abbildung. Durch Einsetzen der Gleichungen folgt direkt:

$$V = \frac{1}{\frac{g}{f} - 1} \quad (6.4)$$

Bei der virtuellen Abbildung gilt $g < f$. Nähert sich die Gegenstandsweite der Fokusslänge bzw. rückt das Display näher an den Fokus der Abbildungsoptik, so erreicht die Vergrößerung betragsmäßig sehr hohe Werte. Die Positionierung des Displays nahe der Brennweite wird dadurch wesentlich kritischer, da die Bilddistanz dort empfindlich auf die Lagetoleranz des Displays reagiert.

Bei der Auslegung des Systems ist es vorteilhaft, verschiedene Größen der genutzten, vergrößert abzubildenden Displayfläche zu erlauben. Abb. 6.10 zeigt dazu den Ort vom virtuellen Bild abgebildeter Punkte auf der Displayfläche. Bei großen Auslenkungen des Displays wird dabei ein etwas kleinerer Bereich der Fläche genutzt.

Mit Hilfe eines von *Bosch Car Multimedia* stammenden Matlab-Programms wurde die durchschnittliche Spotgröße der Abbildung des virtuellen Bildes auf die Displayfläche aus verschiedenen Bildpunkten und aus verschiedenen Positionen innerhalb der Gesamteyebow bestimmt. Das Tool passt dabei die virtuelle Leinwanddistanz für

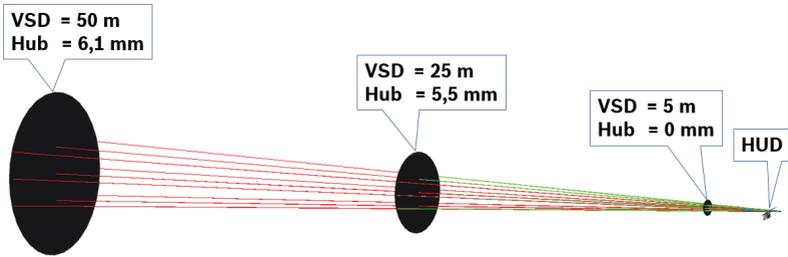


Abbildung 6.9: Virtuelle Leinwandabstände des zur Auslegung der Optik invertierten Designs mit Abbildung des virtuellen Bildes auf das Display. Der notwendige Displayshift (Hub) zum Erreichen der 50 m Leinwandabstand gegenüber der 5 m-Position beträgt 6,1 mm.

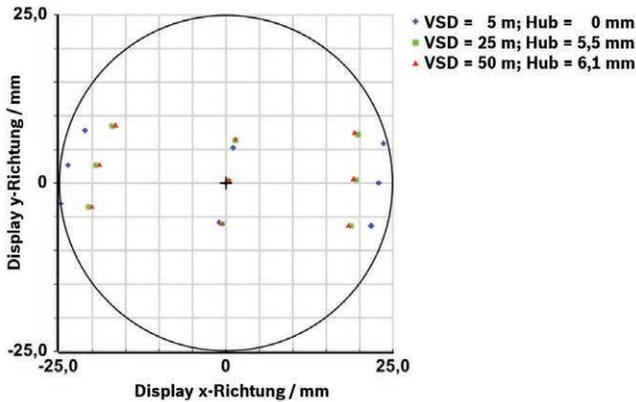


Abbildung 6.10: Abbildung von neun Feldpunkten des virtuellen Bildes auf das Display bei unterschiedlichen Leinwandabständen. Durch die angepasste Optimierungsfunktion sind Variationen der Displaygröße in x- und y-Richtung zugelassen.

jeden Punkt einzeln an und wertet damit auch diese Distanz für die einzelnen Bildpunkte aus. Die Berechnung erfolgt über eine 8 mm Apertur innerhalb der Gesamteyebow. In Tab. 6.6 ist das Ergebnis der

durchschnittlichen Spotgrößen für die verschiedenen Systemzustände dargestellt. Es werden kleine Spotgrößen für alle Zustände erreicht.

Hub	0 mm	5,5 mm	6,1 mm
Spot	18 μm	27 μm	31 μm

Tabelle 6.6: Bewertung der Spotgröße der verschiedenen Betriebszustände des Designs aus Abb. 6.9. Die Systemapertur innerhalb der Gesamteyebox beträgt 8 mm. Es werden jeweils 9×5 Bildpunkte aus 5×3 über die Gesamteyebox verteilte Positionen ausgewertet.

Das virtuelle Bild aus dem Zentrum der Gesamteyebox bei einer Apertur von 8 mm und einer Displayverschiebung von 0 mm ist links in Abb. 6.11 dargestellt. Das Bild wölbt sich am oberen und unteren Rand hin zu etwa 7 m, während das Zentrum im Bereich der angestrebten 5 m bleibt. Rechts in der Abbildung ist der virtuelle Bildabstand für den maximal abweichenden Fall aus der Position in der linken, oberen Ecke der Gesamteyebox gezeigt. Die obere Bildzeile zeigt hier bereits Leinwanddistanzen von über 10 m an einzelnen Stellen der Anzeige. In einem volumetrischen System, bei dem die Tiefenebenen zeitsynchron durchfahren und die Bildinformation jeweils zugeschaltet wird, kann die abweichende Leinwanddistanz am Rand durch ein entsprechend zeitlich versetztes Zuschalten des Bildbereiches kompensiert werden.

Zu höheren Distanzen hin werden Abweichungen der Leinwanddistanz bzw. die Wölbung der Leinwand bedingt durch die hohe Toleranzanfälligkeit nahe des Fokuspunktes der Abbildungsoptik größer. Abb. 6.12 zeigt dazu den Vergleich der Leinwanddistanzen der einzelnen Bildpunkte bei einer Displayverschiebung von 0 mm und 5,5 mm. Gezeigt sind jeweils Histogramme, die die Anzahl der

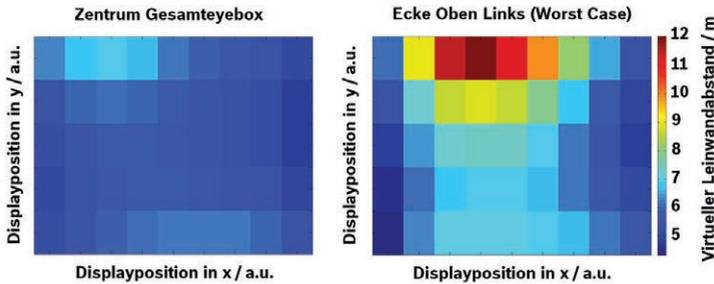


Abbildung 6.11: Links: Ergebnis einer Analyse des virtuellen Leinwandabstandes im Design aus Abb. 6.8 bei einem Displayshift von 0 mm mit Hilfe eines Matlab-Tools des Bosch Geschäftsbereichs *Car Multimedia* [98]. Dargestellt ist der virtuelle Leinwandabstand bestimmt über eine 8 mm Apertur aus dem Zentrum der Gesamteyebox. Rechts: Bestimmung des Leinwandabstandes aus der linken oberen Ecke der Gesamteyebox als Worst Case aus allen Eyeboxpositionen.

ermittelten Messpunkte aus verschiedenen Positionen innerhalb der Gesamteyebox bei der jeweiligen Leinwanddistanz zeigen.

Es ist erkennbar, dass bei der hohen Vergrößerung mit ausgelenktem Display die Wölbung der Leinwand stark zunimmt und die Abstände der Bildpunkte teilweise hohe Werte erreichen. Die Diagramme geben einen Hinweis darauf, dass die minimalen Spotgrößen bei geringeren Abständen erreicht werden, als bei der Zielfunktion vorgegeben wurde. Durch die Optimierungsfunktion wird der Abbildungsbereich des HUDs aufgeweitet, das Design tendiert aber naturgemäß zu kleineren Bereichen.

Zur Evaluation der tatsächlichen Leinwanddistanzen im Betrieb des eigentlichen Systems wurde eine nicht invertierte Simulation der Optik analysiert, bei der Feldpunkte auf der Displayfläche bei verschiedenen Auslenkungen des Displays auf die virtuelle Leinwand

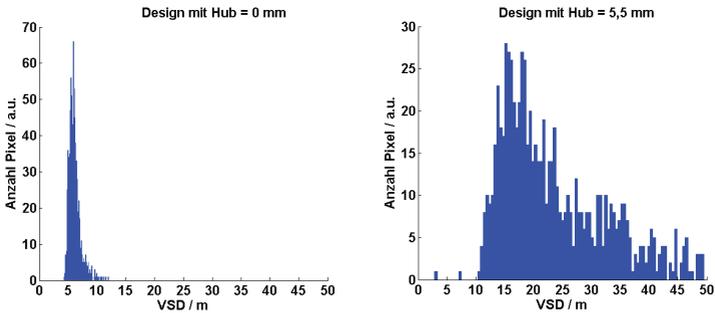


Abbildung 6.12: Links: Auswertung des virtuellen Bildabstandes einzelner Pixel des virtuellen Bildes aus verschiedenen Positionen in der Gesamteyebox. Das Histogramm gibt an, wie viele untersuchte Bildpunkte des aus verschiedenen EB-Positionen ausgewerteten Bildes sich in welchem virtuellen Abstand befinden. Das Display befindet sich in Grundposition. Rechts: Auswertung für einen Hub von 5,5 mm. Das virtuelle Bild verschiebt sich zu größeren Entfernungen, die Wölbung der Leinwand nimmt jedoch deutlich zu. Die Datenauswertung erfolgte mit Hilfe eines bei Bosch entwickelten Matlab-Codes [64].

abgebildet werden. Der Abstand der virtuellen Leinwand wurde dabei bestimmt als das Minimum der durchschnittlichen Spotgrößen der abgebildeten Punkte.

Abb. 6.13 zeigt das Ergebnis der Untersuchung bei verschiedenen Displaypositionen. Das virtuelle Bild in der nicht invertierten Simulationsrichtung befindet sich in geringerem Abstand als in der invertierten Simulation vorgegeben. Das ausgelegte System erreicht Bildabstände zwischen 5,1 m und 20,3 m bei Displaypositionen innerhalb eines Bereiches von 6,1 mm.

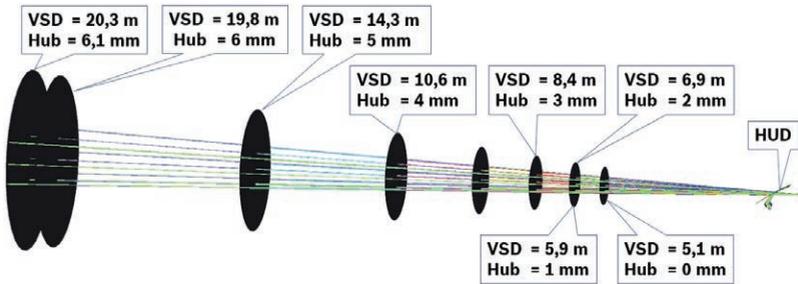


Abbildung 6.13: Ergebnis einer Analyse des nicht invertierten Designs mit Abbildung des Displays ins virtuelle Bild. Die Leinwandabstände (VSD) sind gegenüber dem invertierten Design reduziert.

6.3 FAZIT

Die Realisierbarkeit eines direktabbildenden HUDs mit Mikrodisplay wurde durch simulative Untersuchungen und theoretische Überlegungen sowohl auf Basis eines DLP- als auch auf Basis eines LCoS-Chips gezeigt. Das Konzept ist auch auf einen autostereoskopischen Ansatz anwendbar und ist mit hohen Anforderungen an die Abbildungsoptik verbunden, die über eine größere Anzahl an Spiegeln erfüllt werden können. Das System benötigt dadurch einen vergleichsweise großen Bauraum.

Die im Rahmen der Untersuchung erstellen Designs der HUD-Optik konnten die erforderliche Bildqualität erreichen und bewegten sich in optischen Bauräumen unter 10l. Ein Designansatz mit vier Freiformspiegeln erreichte dabei verschiedene Bilddistanzen zwischen 5 m und 15 m.

Labortechnische Untersuchungen sowohl mit einem DLP- als auch mit einem LCoS-Chip konnten einen potentiell hohen Kontrast, sowie die potentiell hohe Bildqualität bestätigen. Der LCoS-Ansatz zeigte gegenüber dem DLP-System zusätzlich den Vorteil geringerer, störender Beugungseffekte.

Ein volumetrischer Ansatz wurde untersucht, bei dem die Distanz zur Leinwandebene des HUDs zeitlich variiert, um Bildinhalte im dreidimensionalen Raum aufbauen zu können. Wesentliche Vorteile sind das Lösen des Konflikts zwischen Bilddistanz und Akkommodationsdistanz des Auges und die Vermeidung jeglichen Übersprechens. Mit der vorgestellten, auf das volumetrische HUD angepassten Optimierungsfunktion kann die notwendige Toleranz bezüglich der Abbildungsebenen erreicht werden. Ein mit Hilfe dieser Funktion erstelltes, optisches Design erreicht effektiv wahrgenommene Leinwanddistanzen zwischen 5,1 m und 20,3 m. Eine Untersuchung der Abbildungsqualität zeigte geringe Spotgrößen in allen Systemzuständen. Die Wölbung der virtuellen Leinwand in verschiedenen Abbildungsebenen kann durch den zeitlichen Bildaufbau kompensiert werden.

Zur Realisierung steht die Entwicklung einer Bildgebereinheit mit schnell beweglichem Display und entsprechender Hinterleuchtung aus, die den Bildinhalt beim Durchlaufen der Abbildungsebenen schnell und in ausreichender Helligkeit aufbauen kann.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Folgenden werden eine Zusammenfassung dieser Arbeit, sowie ein Ausblick auf mögliche Weiterarbeiten gegeben.

ZUSAMMENFASSUNG

In der vorliegenden Arbeit wurden simulative Methoden für den Designprozess eines autostereoskopischen Head-up Displays entwickelt und auf verschiedenen Technologien beruhende Systeme designt, in Prototypen realisiert und charakterisiert.

Als Teil der Simulationsmethodik wurde eine Optimierungsfunktion entwickelt, mit der Systeme ausgelegt werden können, die eine hohe Abbildungsqualität unter Inkaufnahme einer erhöhten Verzerrung des Bildes erreichen. Die Verzerrungen lassen sich im stereoskopischen Ansatz durch einen geeigneten Warpingsatz für die den beiden Augen zugeführten Teilbilder separat und damit besonders effizient kompensieren. Es wurde gezeigt, dass mit diesem Ansatz die erreichten Spotgrößen und der Astigmatismus des Systems im Vergleich zu einer konventioneller Weise genutzten Optimierungsfunktion deutlich reduziert werden können.

In einem vorgestellten Verfahren werden Elemente der Bildgebereinheit des HUD-Systems mit in die sequentielle Simulation der Abbildungsoptik integriert, um die beiden Teilsysteme aufeinander anzupassen. Damit wurde ermöglicht, eine besonders präzise

Abstrahlcharakteristik der Bildgebereinheit zur Formung schmaler Eyeboxen zu realisieren. Zur Toleranzuntersuchung des Systems wurde ein Simulationstool entwickelt, das die Abweichungen der Positionen des virtuellen Bildes und des nutzbaren Bereichs der Gesamteyebox bedingt durch die Lagetoleranzen der optischen Elemente bestimmt. Die Abweichungen können durch einen entsprechenden Vorhalt bei der Dimensionierung der Optiken berücksichtigt werden. Eine Formabweichung der Spiegelelemente wird durch eine Rückführung von in Prototypen vermessenen Oberflächen berücksichtigt. In weiteren, nichtsequentiellen Verfahren wird das Gesamtsystem des Head-up Displays simuliert. Das wahrgenommene, virtuelle Bild wird durch die Integration eines Beobachterauges untersucht, wodurch beispielsweise die Homogenität und die Verzeichnung des Bildes evaluiert werden können. Im optischen Design werden Systemparameter auf der Grundlage dieser Simulationen angepasst, um den Bildeindruck zu optimieren.

Auf Basis der Simulationsmethodik wurden verschiedene, autostereoskopische Systemkonzepte entwickelt und designt. Als eine Hauptgruppe wurden projektionsbasierte Systeme mit Einsatz von LCoS-Chips, DMD-Chips und scannenden Mikrosiegeln untersucht. Als Lichtquellen wurden sowohl LEDs als auch Laserdioden eingesetzt. Ein untersuchtes Konzept, das einen LED-Projektor mit DLP-Technologie und eine MLA-Projektionsfläche einsetzt, erreichte eine hohe Helligkeit und eine hohe Abbildungsqualität, benötigt aber konzeptbedingt zwei Projektoren zur Realisierung der beiden Teilbilder und muss aufwändig mit den Augenbewegungen nachgeführt werden.

Die Untersuchung von auf Laserlicht basierenden Konzepten mit der Integration von holographischen Elementen zeigte, dass solche Systeme sehr geringe Bauräume erreichen können. Die entwickelte

Simulationsmethodik konnte auch auf ein neuartiges Datenbrillensystem angewendet werden. Zur Realisierung einer Speckle unterdrückenden Bildgebereinheit wurde im Rahmen der Untersuchungen ein laserbasierter DLP-Projektor realisiert, der entstehende Speckle durch zeitsequentielle Modulation unterdrückt und damit für ein breites Anwendungsfeld einsetzbar ist.

Als eine zweite Hauptgruppe wurden LCD-basierte Konzepte untersucht. Ein als Prototyp realisiertes System mit Komponenten, die automotivetauglich verfügbar sind, arbeitet mit einer Strahlteilerlösung, bei der zwei LCD-Zellen virtuell miteinander überlagert werden und jeweils ein Teilbild für ein Auge erzeugen. Nach den Untersuchungen eines ersten Laborprototypen wurde das Konzept in einem Prototypen mit einer Serienfrontscheibe realisiert, der ein anwendungsnahes System zur Untersuchung des autostereoskopischen Bildeindrucks im Head-up Display bereitstellt. In einer fortgeschrittenen Version des Systemkonzepts wurde die Nachführung der erzeugten Eyeboxen mit der Augenbewegung durch eine mechanische Nachführung von Blenden mit geringer Masse und geringer, damit verbundener mechanischer Latenzzeit realisiert. Das Konzept wurde in einem weiteren Prototypen umgesetzt, der in Zusammenarbeit mit der Firma *BMW Forschung und Technik GmbH* ins Fahrzeug integriert wurde.

Als eine Alternative zur Strahlteilerlösung wurden autostereoskopische HUD-Konzepte auf Basis von mit Lentikularlinsen versehenen LCD-Zellen betrachtet. Ein untersuchter Ansatz bestand in der direkten Einspiegelung einer solchen LCD-Zelle über die Frontscheibe des Fahrzeugs. Für dieses Konzept wurden Maßnahmen zur Reduktion des Doppelbildes und der durch Sonnenlicht entstehenden Blendreflektionen entwickelt und auf das System angepasst. Die erarbeiteten Techniken sind auch auf konventionelle Head-up Displays anwendbar.

Die entwickelte Simulationsmethodik eignet sich zur Auslegung von auf Lentikularlinsen beruhenden Systemen.

Als Teil einer Sondergruppe von HUD-Systemen wurde ein Konzept mit direkter, virtueller Abbildung eines Mikrodisplays untersucht. Das System zeigte eine potentiell hohe Bildqualität unter hohen Anforderungen an die Abbildungsoptik. Ein zweites Sonderkonzept bestand in einem volumetrischen Ansatz mit variabler virtueller Leinwanddistanz, für das eine Simulationsmethodik für den optischen Designprozess entwickelt und ein nutzbarer Abbildungsbereich in einem ausgelegten Design bestimmt wurde.

AUSBLICK

Die realisierten Prototypen auf LCD-Basis bieten eine erfahrbare Plattform zur Untersuchung der Wahrnehmung im autostereoskopischen HUD und dienen zur Demonstration der Technologie. Entsprechende Nutzerstudien wurden bereits im Rahmen des Bosch Projekts „Autostereoskopisches HUD“ auch in Zusammenarbeit mit BMW durchgeführt. Die Plattformen eignen sich für weitere Untersuchungen für spezielle Anwendungsfälle.

Als ein vielversprechender Ansatz für eine mögliche Serienentwicklung eines autostereoskopischen HUDs mit nur einem Bildgeber werden auf Lentikularlinsen basierende Systeme betrachtet. Auf Basis der vorgestellten Simulationen kann ein solches System ausgelegt und als Prototyp realisiert werden.

Die im Rahmen dieser Arbeit entstandene, laserbasierte Projektionseinheit mit zeitsequentieller Modulierung des Specklemusters kann auch in nicht stereoskopischen Konzepten eingesetzt und dort mit holographischen Optiken kombiniert werden, um ein HUD-System

mit geringem Bauraumvolumen zu realisieren. Die Integration einer holographischen Optik in die Frontscheibe erfordert großflächige Hologramme, die alle drei Grundfarben verarbeiten können. Die Realisierung solcher Hologramme unter Vermeidung entstehender Blendreflektionen, verursacht durch das Hologramm rekonstruierende Sonnenstrahlen, steht noch aus.

Die im Rahmen der Konzeptuntersuchungen dieser Arbeit realisierte, holographische Projektionsfläche mit an die Abbildungsoptik des HUDs angepasster Abstrahlcharakteristik trägt selbst zur Granulation im Bild bei, da bei der rückwärtigen Hologrammaufnahme durch die Abbildungsoptik Streuflächen eingesetzt wurden. Eine Möglichkeit, eine solche Projektionsfläche speckelfrei zu realisieren, besteht in der pixelweisen Einbelichtung des Hologramms. Eine technische Herausforderung besteht in der Reduzierung der Pixelgröße solcher Hologramme. Neue Entwicklungen in der Verfügbarkeit der holographischen Materialien ermöglichen hier weitere Fortschritte. Eine solche Projektionsfläche für ein spezielles HUD-System ist noch zu realisieren.

A ANHANG

A.1 ERGÄNZUNGEN ZUR SIMULATIONSMETHODIK

A.1.1 TRANSMISSIONSMESSUNG EINER LCD-ZELLE

Hohe Vergrößerungen der Abbildungsoptik eines HUD-Systems führen tendenziell zu breiten Abstrahlwinkeln am Display der Bildgebereinheit. Wird eine LCD-Zelle als Bildgeber verwendet, so ist die verringerte Transmission bei schräger Durchleuchtung zu berücksichtigen. Die Vermessung eines für Automotiveanwendungen entwickelten LCD-Moduls der Firma *JDI* ergab beispielsweise eine Transmission von etwa 70 % bei schräger Durchleuchtung im Winkel von 45° (vgl. Abb. A.1).

A.1.2 MESSDATENBASIERTE SIMULATION VON SPIEGELELEMENTEN

Aufgrund von Toleranzen bei der Herstellung weicht die Oberfläche einer Spiegeloptik von der idealen, bei der simulativen Auslegung festgelegten Form ab. Um den Einfluss dieser Formabweichung auf die optische Qualität des Systems zu bestimmen, kann die Oberfläche des Spiegels vermessen und wieder in die optische Simulation importiert werden.

Die Firma *3D-Shape GmbH* bietet dazu Messsysteme an, die auf dem Prinzip der phasenmessenden Deflektometrie beruhen und eine Messunsicherheit von $\pm 0,02$ dpt besitzen [127]. Ein solches Messsystem liefert die Spiegeloberfläche in gängigen 3D-Datenformaten

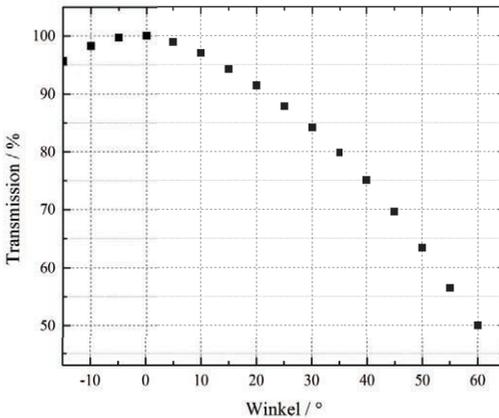


Abbildung A.1: Messung der Transmission eines LCD-Moduls unter verschiedenen Winkeln. Vermessen wurde dabei ein 3,1“ LCD-Modul der Firma Sony unter kollimierter Beleuchtung einer grünen LED der Firma Osram (Golden Dragon).

wie beispielsweise .step oder .stl. Diese Formate beruhen darauf, die Spiegeloberfläche mit kleinen, planen Flächenelementen anzunähern, die mosaikartig zusammengesetzt werden. Ein solches CAD-Objekt kann ins optische Design importiert werden, ist dann allerdings nicht mehr veränderbar. Weiterführende Simulationen oder gar ein Rückschluss auf bestimmte Oberflächenkoeffizienten sind dadurch nicht mehr möglich.

Ein Ansatz ist daher, die Oberfläche des bei der Vermessung des Spiegels erhaltenen CAD-Objekts durch einen Oberflächenfit wieder auf eine parametrisierbare, auf Polynomkoeffizienten basierende Oberfläche zurückzuführen, wie sie auch beim ursprünglichen Design der Optik verwendet wurde. Hierzu wurde ein vom Geschäftsbereich *Car Multimedia* der *Robert Bosch GmbH* entwickeltes Programm, das 2D-Oberflächenfits an Messpunkten durchführt, derart umprogrammiert, dass damit das .stl-Datenformat ausgewertet werden kann.

Der Oberflächenfit wird dabei mit dem Polynomgrad 7 durchgeführt. Die Spiegel des in Abb. A.2 gezeigten, vom Bosch Geschäftsbereich *Car Multimedia* entwickelten und als Prototyp realisierten Designs wurden vermessen und die Messdaten gefittet. Bei den Spiegeln handelte es sich um mit Aluminium bedampfte Glasspiegel von vergleichsweise geringer Qualität.

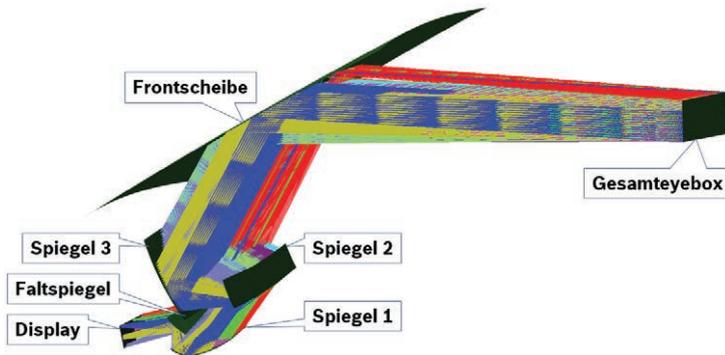


Abbildung A.2: Design eines arHUDs mit 15 m Leinwanddistanz, das auf 4 Freiformspiegeln und einem Faltspiegel beruht. Die Spiegel des Designs wurden durch phasenmessende Deflektometrie vermessen. Die erhaltenen CAD-Daten wurden gefittet und die angenäherten Polynomkoeffizienten wieder ins optische Design importiert. Das ursprüngliche optische Design stammt vom Bosch Geschäftsbereich *Car Multimedia* [128].

Es gilt beim Fit der Oberfläche darauf zu achten, dass die Abweichung des Oberflächenfits zu den Messdaten gering gegenüber den Abweichungen zur idealen Oberfläche ist. In Abb. A.3 ist die Abweichung des Fits zur gemessenen Fläche für den dritten Spiegel des HUD-Designs dargestellt.

Der Spiegel wurde bei der Herstellung etwas größer dimensioniert als ursprünglich im optischen Design entworfen. Innerhalb

des genutzten Bereichs zeigt der Spiegel eine Abweichung im einstelligen μm -Bereich.

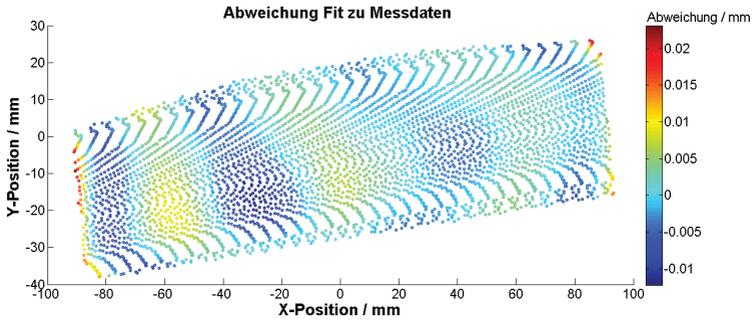


Abbildung A.3: Abweichung der gefitteten Daten der Spiegeloberfläche zu den vermessenen CAD-Daten. Im genutzten Bereich des Spiegels liegt die Abweichung im einstelligen μm -Bereich.

Die Spotgröße des ursprünglichen optischen Designs mit idealen Spiegeln betrug $8,6 \mu\text{m}$ (RMS Radius). Die Systemapertur betrug dabei 8 mm und entspricht damit der angenommenen Apertur eines menschlichen Auges.

Nach dem Importieren der gefitteten Daten der drei realen Spiegel vergrößerte sich die Spotgröße auf $196,5 \mu\text{m}$. Ein deutlicher Auflösungsverlust der HUD-Optik ist erkennbar.

A.2 ERGÄNZUNGEN ZU PROJEKTIONSKONZEPTEN

A.2.1 HOLOGRAPHISCHES STEREO HUD MIT EINZELNEM PROJEKTOR

Als Ergänzung zum in Kap. 4.5 vorgestellten HUD-System mit DLP-Laserprojektor und holographischer Projektionsfläche sollen an dieser

Stelle ergänzende Konzepte zur Realisierung des autostereoskopischen Systems mit nur einem Projektor vorgestellt werden.

Abb. A.4 zeigt links ein solches Konzept auf Basis eines Transmissionshologramms. Der Laserprojektor bespielt dabei eine Projektionsfläche, die in zwei Teilbereiche untergliedert ist, welche jeweils ein stereoskopisches Teilbild darstellen. Die beiden Teilbilder werden mittels eines Strahlteilers überlagert, der ebenfalls holographisch ausgeführt sein kann. Im Falle der holographischen Ausführung des Strahlteilers wirkt dieser sowohl als Transmissions-, als auch als Reflektionshologramm. Rechts im Bild ist eine Variante mit Reflektionshologrammen dargestellt.

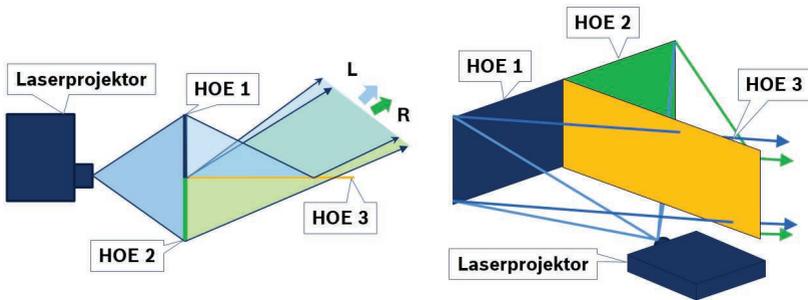


Abbildung A.4: Bildgeberkonzepte eines autostereoskopischen HUDs mit einzelner Projektor auf Basis von Hologrammen (HOE, Holographisch Optisches Element). Links: Aufbau mit einem Transmissionshologramm als Projektionsfläche. Rechts: Aufbau mit einem Reflektionshologramm.

Durch die holographische Ausführung der Projektionsfläche kann das Licht des Projektors effizient in die benötigte Richtung umgelenkt werden. Die Winkelselektivität des Hologramms ermöglicht die Realisierung der beiden unterschiedlichen optischen Funktionen. Bei

den Hologrammen handelt es sich jeweils um RGB-Hologramme, in denen einzelne Hologramme für die drei Grundfarben enthalten sind.

A.2.2 MECHANISCHER AUFBAU DLP-LASERPROJEKTOR

Der in Kap. 4.5.1 vorgestellte Laserprojektor wurde auf Basis eines DLP-Beamers entwickelt, dessen Hinterleuchtungseinheit mit einer laserbasierten Anordnung ersetzt wurde. Zur Realisierung im umgebauten Prototypen wurde im Rahmen dieser Arbeit das in Abb. A.5 links gezeigte CAD-Modell konstruiert, auf dessen Basis die rechts im Bild gezeigte Einheit im Forschungsmusterbau angefertigt wurde [99].

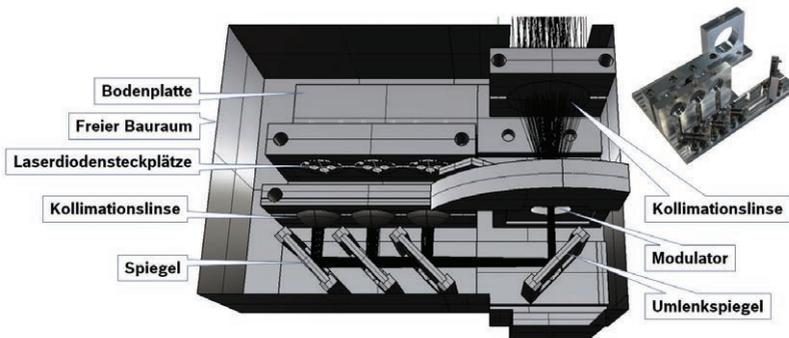


Abbildung A.5: CAD-Modell einer im Rahmen dieser Arbeit konstruierten Mechanik als Ersatz für die originale Hinterleuchtungseinheit des *ML-550*-Projektors. Rechts im Bild ist die auf Basis des Modells vom Musterbau hergestellte Einheit abgebildet [99]. Die Bildrechte der Realaufnahme liegen bei der Robert Bosch GmbH.

Die Anordnung überlagert drei Laserdioden, die an verschiebbaren Steckplätzen angebracht sind. Das überlagerte Laserlicht wird auf einen Phasenmodulator umgelenkt, der in einen definierten

Raumwinkel streut. Nach anschließender Kollimierung folgt die ursprüngliche Homogenisierung im Projektor durch ein Mikrolin-senarray (vergleiche Abb. 4.11 , S. 96).

A.3 ERGÄNZUNGEN ZU DISPLAYKONZEPTEN

A.3.1 SINGLE LCD KONZEPT

Das in Kap. 5.1 vorgestellte Strahlteilerkonzept basiert auf der Verwendung von zwei LCD-Zellen, die jeweils ein stereoskopisches Teilbild darstellen und mittels eines Strahlteilers überlagert werden. In diesem Konzept müssen die LCDs nicht zwingend senkrecht zueinander stehen, sondern können je nach Konfiguration auch anders orientiert werden. Dadurch ist das Konzept in spezieller Anordnung auch mit einer einzelnen LCD-Zelle realisierbar. Der schematische Aufbau findet sich in Abb. A.6.

Ein senkrecht auf einer LCD-Zelle stehender Strahlteiler unterteilt die Displayfläche dabei in zwei Bereiche, die optisch überlagert werden. Jede Hälfte der LCD-Zelle übernimmt dann die Funktion eines Bildgebers für ein stereoskopisches Teilbild. Die beiden Displayhälften werden jeweils mit einer Hinterleuchtung versehen, wodurch sie in Richtung einer schmalen Eyebox strahlen. Die Funktionsweise des Systems ist ansonsten analog zum in Kap. 5.1 vorgestellten Konzept.

Die Trennung in zwei Displayhälften ermöglicht eine jeweils eigene Hinterleuchtung zur Erzeugung der beiden Eyeboxen, wodurch das System autostereoskopisch realisiert werden kann. Aus der Literatur bekannte Konzepte, bei denen eine LCD-Zelle mittels Wire Grid-Technologie räumlich in unterschiedlich polarisierte Abschnitte

unterteilt wird, verwenden eine 3D-Brille zur Trennung der Teilbilder direkt vor dem Auge des Nutzers [129].

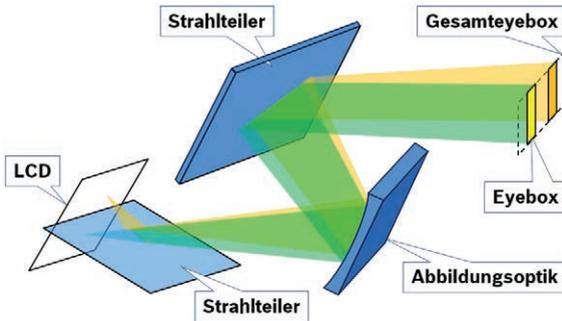


Abbildung A.6: Stereoskopisches Strahlteilerkonzept mit einer einzelnen LCD-Zelle als Bildgeber. Die beiden Hälften einer LCD-Zelle werden mittels eines senkrecht auf der Displayfläche stehenden Strahlteilers miteinander überlagert und stellen jeweils ein Teilbild dar.

Ein Design des untersuchten Systems konnte simulativ auf Basis der in Kap. 4.1 vorgestellten Optik ausgelegt werden. Damit das Licht den senkrecht auf der LCD-Zelle stehenden Strahlteiler durchläuft, steht die Displayfläche anders als in der Testoptik ursprünglich vorgesehen, schräg zur optischen Achse. Durch die Displayverkipfung tritt ebenfalls eine leichte Verkipfung des virtuellen Bildes auf.

In einem Laboraufbau mit der Testoptik wurde die Machbarkeit des Prinzips demonstriert. Aufgrund des zur Verfügung stehenden 3,1'' Displays reduzieren sich die effektive Displaygröße, sowie die zur Verfügung stehende Auflösung durch die Aufteilung um die Hälfte. Das virtuelle Bild nimmt dann im Blickfeld nur noch die halbe Fläche gegenüber der Abbildung des kompletten Displays ein.

In Tab. A.1 finden sich einige Messwerte des Aufbaus. Das Teilbild der rechten Eyebox wird in flachem Winkel durch den Strahlteiler

transmittiert. Der Kontrast in diesem Teilbild fällt deutlich geringer aus als im reflektierten Pfad.

Strahlteilerkonzept mit einzelner LCD-Zelle	
Übersprechen	0,24 %
SW-Kontrast Linke EB	3035 : 1
SW-Kontrast Rechte EB	1877 : 1
4 % Kontrast innen Linke EB	205 : 1
4 % Kontrast innen Rechte EB	154 : 1
4 % Kontrast außen Rechte EB	800 : 1
4 % Kontrast außen Rechte EB	358 : 1

Tabelle A.1: Übersicht über einige Messwerte des auf einer einzelnen LCD-Zelle beruhenden Strahlteilerkonzepts nach Abb. A.6.

A.3.2 ANSTEUERPROGRAMM FAHRZEUGDEMONSTRATOR

In Kap. 5.4.2 wird der Prototyp eines autostereoskopischen HUDs als Fahrzeugdemonstrator vorgestellt, bei dem eine C#-basierte Ansteuerung der mechanischen Nachführung und der Lichtquellen erfolgt. Ergänzend zum beschriebenen System findet sich in Abb. A.7 eine Darstellung der Benutzeroberfläche des Ansteuerprogramms. Dabei wurde ein vom *Fraunhofer HHI* bereitgestelltes Programm zur Datenauswertung des Head-Tracking Systems und deren Bereitstellung um die Funktionen der Motoren- und Lichtquellenansteuerungen erweitert.



Abbildung A.7: Benutzeroberfläche des C#-Ansteuerprogramms für den Fahrzeugdemonstrator. Der linke Teil visualisiert die vom Fraunhofer HHI stammende Softwarekomponente, die die Datenverarbeitung und Bereitstellung des Head-Tracking Systems beinhaltet. Der rechte Teil wurde im Rahmen der Promotion hinzugefügt und beinhaltet die Motoren- und Lichtquellensteuerung.

PUBLIKATIONSLISTE

PATENTE

Auf Basis der im Rahmen der vorliegenden Arbeit verfassten Erfindungsmeldungen wurden die nachfolgenden Patententwürfe von einer beauftragten Anwaltskanzlei formuliert und beim Patentamt eingereicht.

- T. Werner and R. Fieß, „Abdeckelement zum Abdecken einer Projektionsöffnung eines Head-up-Displays, Head-up-Display und Verfahren zum Leiten von Licht durch ein Abdeckelement,“ Erfindungsmeldung (Patententwurf in Bearbeitung beim Patentamt, amtliches Aktenzeichen 102015222842.8), 2015
- T. Werner and R. Fieß, „Projektionselement, Projektionssystem und Verfahren zum Projizieren,“ Erfindungsmeldung (Patententwurf in Bearbeitung beim Patentamt, amtliches Aktenzeichen 102016213335.7), 2015
- T. Werner and R. Fieß, „Hinterleuchtungsvorrichtung zum Hinterleuchten einer Anzeigeeinheit für ein Head-up-Display, Head-up-Display und Verfahren zum Hinterleuchten einer Anzeigeeinheit für ein Headup- Display,“ Erfindungsmeldung (Patententwurf in Bearbeitung beim Patentamt, amtliches Aktenzeichen 102015226425.4), 2014
- T. Werner and R. Fieß, „Bilderzeugungsvorrichtung für ein Head-up- Display, Head-up-Display und Verfahren zum Erzeugen eines Bilds für ein Head-up-Display,“ Erfindungsmeldung (Patententwurf in Bearbeitung beim Patentamt, amtliches Aktenzeichen 102014217180.6), 2014

- T. Werner and R. Fieß, „Sichtfeldanzeigevorrichtung für ein Fahrzeug und Verfahren zum Darstellen eines Bildes in einem Sichtbereich einer Person,“ Erfindungsmeldung (Patententwurf in Bearbeitung beim Patentamt, amtliches Aktenzeichen 102015206796.3), 2014
- T. Werner and R. Fieß, „Bildgebereinheit für ein Head-up-Display, Head-up-Display und Verfahren zum Erzeugen stereoskopischer Halbbilder mittels einer Bildgebereinheit,“ Erfindungsmeldung (Patententwurf in Bearbeitung beim Patentamt, amtliches Aktenzeichen 102015216984.7), 2014
- T. Werner and R. Fieß, „Projektionsvorrichtung für eine Bildgebereinheit eines Head-up-Displays, Bildgebereinheit, Verfahren zum Betreiben einer Projektionsvorrichtung und Verfahren zum Erzeugen eines Bildes in einem Head-up-Display,“ Erfindungsmeldung (Patententwurf in Bearbeitung beim Patentamt, amtliches Aktenzeichen 102015215097.6), 2014
- T. Werner and R. Fieß, „Projektionsvorrichtung für eine Datenbrille, Datenbrille und Verfahren zum Betreiben einer Projektionsvorrichtung für eine Datenbrille,“ Erfindungsmeldung (Patententwurf in Bearbeitung beim Patentamt, amtliches Aktenzeichen 102015213376.1), 2014
- T. Werner and R. Fieß, „Bildgebereinheit für ein Head-up-Display, Head-up-Display und Verfahren zum Erzeugen stereoskopischer Halbbilder mittels einer Bildgebereinheit,“ Erfindungsmeldung (Patententwurf in Bearbeitung beim Patentamt, amtliches Aktenzeichen 102015215106.9), 2014
- T. Werner, R. Fieß, and S. Mayer, „Holographisches Strahlformungselement für Laserprojektionssysteme,“ Erfindungsmeldung (Patententwurf in Bearbeitung beim Patentamt, amtliches Aktenzeichen 102016207236.6), 2015

VERÖFFENTLICHUNGEN

- T. Werner, R. Fieß, and C. Neumann, „Optical design and evaluation of autostereoscopic Head-Up Displays,“ in *electronic displays Conference (edC), Nürnberg, Germany, Feb 2016*
- T. Werner, R. Fieß, and C. Neumann, „Optical design of a Flying Spot Projection based autostereoscopic Head-Up Display,“ in *The 5th Laser Display and Lighting Conference (LDC'16), Jena, Germany, Juli 2016*

BETREUTE ARBEITEN

- S. Schmelzer, „Evaluation eines elektromechanischen Nachführungssystems für die Bildgebereinheit eines autostereoskopischen Head-Up Displays,“ Bachelor's Thesis, Hochschule Pforzheim, 2014
- U. A. R. T. Kamwa, „Simulation, setup and evaluation of a laser based projection unit for display systems,“ Master's thesis, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2016

VERÖFFENTLICHTE ERFINDUNGSMELDUNGEN

- T. Werner and R. Fieß, „Polarisationsdrehende Doppelbildreduzierte Frontscheibe,“ veröffentlichte Erfindungsmeldung, 2015
- T. Werner, M. Gilowski, and A. Frederiksen, „Aufnahme von 3D-Objekten mit dem Smartphone,“ veröffentlichte Erfindungsmeldung, 2015

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Abkürzung	Beschreibung
DLP	Digital Light Processing (DLP™, Firma <i>Texas Instruments</i>)
DMD	Digital Micromirror Device
FOV	Field of Fiew, Blickfeld
FWHM	Full Width Half Maximum, Halbwertsbreite
GRIN lens	Gradient-Index lens
HOE	Holographisch Optisches Element, Hologramm
HT	Head-Tracker
HUD	Head-up Display
L	Optische Linse
LCD	Liquid Crystal Display
LCoS	Liquid Crystal on Silicon
LD	Leuchtdichte
LDA	Look Down Angle
LOA	Look Over Angle
LP	Linienpaar
LP-Kontrast	Linienpaarkontrast
MEMS	Mikroelektromechanisches System
MLA	Mikrolinsenarray
MTF	Modulationsübertragungsfunktion
ST	Strahlteiler
TN-Zelle	Twisted Nematic Cell
PGU	Picture Generating Unit, Bildgebereinheit
VID	Virtual Image Distance
VSD	Virtual Screen Distance

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

1.1	Konvergenzwinkel	8
1.2	Positive und negative Parallaxe	8
1.3	HUD-Funktionsprinzip	11
1.4	Schema BoxHUD	13
1.5	Schema arHUD	14
1.6	Schema Combiner-HUD	15
1.7	LCoS- und DLP-Prinzip	16
1.8	Projektorbasiertes HUD	17
1.9	Flying Spot Projektor	18
1.10	Prinzip TN-Zelle	19
1.11	Stereoskopisches HUD-System	21
1.12	Bewegungsparallaxe	23
2.1	Testdesign für MF-Vergleich	29
2.2	Vergleich Verzeichnung bei Optimierungsfunktionen	31
2.3	HUD Design mit PGU Elementen	33
2.4	Beispieldesign Spotgröße bei Lagetoleranz	35
2.5	Tolerancing Ablaufdiagramm	37
2.6	Kompensation der Lagetoleranz	38
2.7	HUD-Design mit MLA-PGU	44
2.8	Eyeboxausleuchtung bei z-Shift des Beobachters	45
2.9	Detektorebenen und Beobachterauege	47
3.1	Schema nutzbares Blickfeld	59
3.2	Nutzbares Blickfeld im 3D HUD	60
3.3	Testbild Kontrastmessung	63
4.1	Design Testoptik	68

4.2	Simulation MLA-LED Beamerkonzept	71
4.3	Zylinderlinsenarrays als Projektionsfläche	73
4.4	Projektion MLA LED Eyeboxform	75
4.5	Projektion MLA LED Vollbild	76
4.6	Vermessung Spot MicroVision	79
4.7	Varianten Flying Spot MLA Projektion	81
4.8	MLA Auslegung Flying Spot Projektion	84
4.9	HUD-Konzept Flying Spot mit HOE	89
4.10	Simulation Laserprojektions-HUD	91
4.11	Simulation Laser-DLP-Projektor	96
4.12	Vergleich Speckleunterdrückung	97
4.13	Testbild DLP-Laserprojektion	98
4.14	Aufnahmeprinzip HOE-Projektionsfläche	99
4.15	Aufbau HOE-Aufnahme	100
4.16	Virtuelles Bild	102
4.17	Eyeboxverlauf	103
4.18	Nachführkonzepte HOE-Projektions-HUD	104
5.1	LCD Strahlteilerkonzept	111
5.2	Alu Transmissionskurve	113
5.3	Polarisation im Strahlteilerkonzept	115
5.4	LCD-Hinterleuchtung mit Streufläche	117
5.5	Leuchtdichte einer LCD mit Luminit-Streuscheibe und LED-Hinterleuchtung	117
5.6	Granulation LCD mit Streufläche	118
5.7	Bildgebereinheit auf MLA-Basis	120
5.8	asHUD mit MLA-Bildgebereinheit	121
5.9	Strukturierte Blende für Bildgebersimulation	122
5.10	Displayausleuchtung einer MLA-Hinterleuchtung	122
5.11	Ausleuchtung der Eyebox bei MLA-PGU	123
5.12	Betrachterauge einer asHUD-Simulation mit MLA-PGU	123

5.13 Mechanisches Gehäuse Labordemonstrator	124
5.14 Systemaufbau Labordemonstrator	126
5.15 Schema Gesamteyebox	130
5.16 Eyeboxnachführung	131
5.17 Hinterleuchtungsprinzip Frontscheiben-Prototyp	133
5.18 Optisches Design Frontscheiben-Prototyp	134
5.19 Bauraumuntersuchung Frontscheiben-Prototyp	136
5.20 Virtuelle Leinwanddistanz Frontscheiben-Prototyp	137
5.21 Sonnenlichtsimulation im Frontscheiben-Prototyp	138
5.22 Mechanischer Aufbau Frontscheiben-Prototyp	139
5.23 Frontscheiben-Prototyp Sitzkiste	140
5.24 Eyeboxform Frontscheiben-Prototyp	141
5.25 Homogenität im virtuellen Bild	142
5.26 Homogenitätsvergleich im Testbild	143
5.27 PGU Schema mit Blendenkonzept	146
5.28 Optisches Design Fahrzeugdemonstrator	147
5.29 Bauraumuntersuchung Fahrzeugdemonstrator	149
5.30 Glare Trap Prinzip	150
5.31 Glare Trap Design Fahrzeugdemonstrator	151
5.32 Virtuelle Leinwanddistanz Fahrzeugdemonstrator	151
5.33 Ausleuchtung Gesamteyebox	153
5.34 Ausleuchtung Gesamteyebox Randpositionen	154
5.35 Beobachteraue Randpositionen der Gesamteyebox	155
5.36 Mechanischer Aufbau Fahrzeugdemonstrator	156
5.37 Fahrzeugdemonstrator vor Einbau	157
5.38 Warpingvergleich virtuelles Bild	159
5.39 Leuchtdichte Beispielszene	159
5.40 Eyeboxform Fahrzeugdemonstrator	161
5.41 Vergleich Eyeboxform zu Bildintensität	161
5.42 Eyeboxverlauf mit 14 mm Blende	163
5.43 Homogenität im virtuellen Bild	164

5.44	Stereoprinzip Lentikularlinsen	167
5.45	Aufbau Lentikularlinsensystem	168
5.46	Pixelzuordnung im Lentikularlinsensystem 550 μm Radius	171
5.47	Pixelzuordnung im Lentikularlinsensystem 450 μm Radius	172
5.48	Doppelbildversatz ggü. virtueller Leinwanddistanz	174
5.49	Doppelbildüberlagerung durch Keilfolie	175
5.50	Keilwinkel ggü. VSD	176
5.51	Doppelbildreduktion per Phasendrehung	179
5.52	Winkelabhängigkeit des Doppelbildkontrasts beim Frontscheibenretarder	181
5.53	Funktionsweise Abdeckung mit Retarder	184
5.54	Retarderkonzept Sonnenlichtblocken	185
5.55	Sonnenreflex Versuchsaufbau Retarder	186
5.56	Sonnenreflex Versuchsergebnis Retarder	187
5.57	Virtuelles Bild bei LED-Matrixhinterleuchtung	188
5.58	Frontscheiben-Demonstrator Lentikularlinsenkonzept	189
6.1	Simulation Direktabbildendes HUD	197
6.2	Simulation Spotgrößen	199
6.3	Prinzip DLP-Beleuchtung	199
6.4	Simulation Direktabbildendes LCoS-HUD	201
6.5	Genutztes Bauraumvolumen	202
6.6	Beleuchtungskonzept Imager	204
6.7	Virtuelles Bild DLP-Aufbau	206
6.8	Optisches Design	210
6.9	VSD in invertiertem Design	212
6.10	Abbildung invertiertes Design	212
6.11	Analyse virtueller Leinwandabstand	214
6.12	Vergleich Virtueller Bildabstand	215
6.13	Ergebnis nicht invertiertes Design	216
A.1	Transmissionsmessung LCD	226

A.2	HUD-Testdesign für Spiegeldaten	227
A.3	Abweichung Spiegel Fit	228
A.4	HOE Strahlteilerkonzept für Projektions-HUD	229
A.5	CAD-Modell DLP-Laserprojektor	230
A.6	Stereo Konzept Einzel-LCD	232
A.7	Benutzeroberfläche Ansteuerprogramm Fahrzeugdemonstrator	234

TABELLENVERZEICHNIS

1.1	Mono- und Binokulare Tiefenhinweise	6
2.1	Abbildungsqualitätsvergleich Optimierungsfunktionen . .	30
2.2	Tolerancing Spiegelvorhalt	40
3.1	HUD-Konzeptübersicht	56
4.1	Testoptik Parameterliste	70
4.2	Parameter System Zylinderlinsenarrays	74
4.3	Messwerte MLA LED-Projektion	77
4.4	Parameter Laser-MLA-Projektionen	82
4.5	Parameter Laserprojektions-HUD	92
4.6	Diodenkenndaten Laserprojektor	96
4.7	Messwerte DPL-Laserprojektion	99
4.8	Messwerte HOE-DLP-Prototyp	102
5.1	Messwerte LCD-Labordemonstrator	127
5.2	Head-Tracker Vergleich	128
5.3	Frontscheiben-Prototyp optische Parameter	135
5.4	Messwerte Frontscheiben-Prototyp	144
5.5	Fahrzeugdemonstrator optische Parameter	152
5.6	Messwerte Fahrzeugdemonstrator	165
5.7	Systemparameter Lentikularlinsensystem	169
5.8	Keilwinkelsimulation	177
5.9	Vergleich Doppelbildmaßnahmen	180
5.10	Optische Parameter Frontscheiben-Demonstrator	190
5.11	Messwerte Frontscheiben-Demonstrator	191

6.1	Parameter Grunddesign vier Spiegel	198
6.2	LCoS-HUD Toleranzanalyse	203
6.3	Messwerte DLP-Laboraufbau	205
6.4	Messwerte LCoS-Laboraufbau	207
6.5	Parameter Grunddesign volumetrisch	210
6.6	Universelle Testoptik Parameterliste	213
A.1	Messwerte Single LCD Konzept	233

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Photonik Forschung Deutschland, "Pico-Projektion mit RGB-Laserdioden in mobilen Endgeräten und in Automotive Applikationen – PICOLO," Förderinitiative Optische Komponenten und Systeme für Volumenmärkte, Förderkennzeichen 13N12602, 2012-2016.
- [2] J. Geng, "Three-dimensional display technologies," *Adv. Opt. Photon.*, vol. 5, no. 4, pp. 456–535, Dec 2013.
- [3] B. H. Urey, K. V. Chellappan, E. Erden, and P. Surman, "State of the Art in Stereoscopic and Autostereoscopic Displays," *Proceedings of the IEEE*, vol. Vol. 99, 2011.
- [4] H. Tauer, *Stereo 3D : Grundlagen, Technik und Bildgestaltung*. Schiele & Schön, 2010.
- [5] B. Mendiburu, *3D Movie Making - Stereoscopic Digital Cinema from Script to Screen*. Elsevier Focal Press, 2009.
- [6] T. Werner, "Evaluierung neuartiger stereoskopischer Bildgeberkonzepte im Rahmen ögP PicoLO," Master's thesis, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2013.
- [7] L. Hill and A. Jacobs, "3-D Liquid Crystal Displays and Their Applications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 94, pp. 575–590, 2006.
- [8] D. M. Hoffman, A. R. Girshick, K. Akeley, and M. S. Banks, "Vergence-accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue," *Journal of Vision*, vol. 8, p. 33, 2008.
- [9] T. Shibata, J. Kim, D. M. Hoffman, and M. S. Banks, "The zone of comfort: Predicting visual discomfort with stereo displays," *Journal of Vision*, vol. 11, p. 11, 2011.

- [10] M. T. M. Lambooi, M. Fortuin, W. A. IJsselsteijn, and I. Heynderickx, "Measuring Visual Discomfort associated with 3D Displays," *Proc. SPIE*, vol. 7237, pp. 72 370K–72 370K–12, 2009.
- [11] M. T. M. Lambooi, W. A. IJsselsteijn, and I. Heynderickx, "Visual discomfort in stereoscopic displays: a review," *Proc. SPIE*, vol. 6490, pp. 64 900I–64 900I–13, 2007.
- [12] S. P. Williams and R. V. Parrish, "New computational control techniques and increased understanding for stereo 3-D displays," *Proc. SPIE*, vol. 1256, pp. 73–82, 1990.
- [13] N. Broy, F. Alt, S. Schneegass, N. Henze, and A. Schmid, "Perceiving Layered Information on 3D Displays Using Binocular Disparity," *PerDis '13*, 2013.
- [14] N. Broy, S. Höckh, A. Frederiksen, M. Gilowski, J. Eichhorn, F. Naser, H. Jung, J. Niemann, M. Schell, A. Schmid, and F. Alt, "Exploring Design Parameters for a 3D Head-Up Display," *Pervasive Displays*, 2014.
- [15] J. P. McIntire, P. R. Havig, and A. R. Pinkus, "A guide for human factors research with stereoscopic 3D displays," *Proc. SPIE*, vol. 9470, pp. 94 700A–94 700A–12, 2015.
- [16] Y.-C. Liu and M.-H. Wen, "Comparison of head-up display (HUD) vs. head-down display (HDD): driving performance of commercial vehicle operators in Taiwan," *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 61, pp. 679 – 697, 2004.
- [17] Z. Medenica, A. L. Kun, T. Paek, and O. Palinko, "Augmented Reality vs. Street Views: A Driving Simulator Study Comparing Two Emerging Navigation Aids," *Proceedings of the 13th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, vol. MobileHCI '11, ACM, pp. 265–274, 2011.

- [18] J. Blume, T. A. Kern, and P. Richter, "Head-up-Display - Die nächste Generation mit Augmented-Reality-Technik," in *Vernetztes Automobil*, ser. ATZ/MTZ-Fachbuch, W. Siebenpfeiffer, Ed. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, pp. 137–143.
- [19] Continental AG. (05.10.2015) Continental zeigt erstmals Head-up-Display mit Augmented Reality für bessere Fahrerinformation, Pressemitteilung vom 14.07.2014. [Online]. Available: http://www.continental-corporation.com/www/presseportal_com_de/themen/pressemitteilungen/3_automotive_group/interior/press_releases/pr_2014_07_14_ueberblick2014_de.html
- [20] Continental AG. (05.10.2015) Continental stellt Combiner-Head-up-Display vor, Pressemitteilung vom 22.07.2014. [Online]. Available: http://www.continental-corporation.com/www/presseportal_com_de/themen/pressemitteilungen/3_automotive_group/interior/press_releases/pr_2014_07_22_combiner_hud_de.html
- [21] P. F. V. Kessel, L. J. Hornbeck, R. E. Meier, and M. R. Douglass, "A MEMS-Based Projection Display," *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, 1998.
- [22] Z. Zhuang, E. Chen, B. Qu, and F. Yu, "Optical Characterization for Off-axis Illumination in DLP System," *Proc. of SPIE*, vol. 8419, 2012.
- [23] M. S. Brennesholtz and E. H. Stupp, *Projection Displays*. John Wiley & Sons, Ltd, 2008.
- [24] N. Koide, *The Liquid Crystal Display Story 50 Years of Liquid Crystal R&D that lead The Way to the Future*. Springer Japan, 2014.
- [25] Y. J. Jung, S. il Lee, H. Sohn, H. W. Park, and Y. M. Ro, "Visual comfort assessment metric based on salient object motion in-

- formation in stereoscopic video," *Journal of Electronic Imaging*, vol. 21, pp. 011 008–1–011 008–16, 2012.
- [26] F. Wientapper, H. Wuest, P. Rojtgberg, and D. Fellner, "A camera-based calibration for automotive augmented reality Head-Up-Displays," *2013 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, 2013.
- [27] J. Weingarten, "Verfahren und Vorrichtung zum Darstellen eines dreidimensionalen Bildes unter Verwendung eines Bildgebers einer Blickfeldanzeigeeinrichtung für ein Fahrzeug," Deutsches Patent, DE102013212667A1, Juni 2013.
- [28] Y. Takaki, Y. Urano, S. Kashiwada, H. Ando, and K. Nakamura, "Super multi-view windshield display for long-distance image information presentation," *OPTICS EXPRESS*, vol. Vol. 19, No. 2, 2011.
- [29] P. Ott, "Optic design of head-up displays with freeform surfaces specified by NURBS," *Proc. of SPIE*, vol. Vol. 7100, 2008.
- [30] T. Werner, R. Fieß, and C. Neumann, "Optical design and evaluation of autostereoscopic Head-Up Displays," in *electronic displays Conference (edC), Nürnberg, Germany*, Feb 2016.
- [31] Robert Bosch GmbH. (2013) Produktbereich Anzeigesysteme. Geschäftsbereich Car Multimedia.
- [32] T. Werner and R. Fieß, "Bildgebereinheit für ein Head-up-Display, Head-up-Display und Verfahren zum Erzeugen stereoskopischer Halbbilder mittels einer Bildgebereinheit," Erfindungsmeldung (Patententwurf in Bearbeitung beim Patentamt, amtliches Aktenzeichen 102015216984.7), 2014.
- [33] T. Werner and R. Fieß, "Projektionselement, Projektionssystem und Verfahren zum Projizieren," Erfindungsmeldung (Patententwurf in Bearbeitung beim Patentamt, amtliches Aktenzeichen 102016213335.7), 2015.

- [34] T. Werner and R. Fieß, "Projektionsvorrichtung für eine Datenbrille, Datenbrille und Verfahren zum Betreiben einer Projektionsvorrichtung für eine Datenbrille," Erfindungsmeldung (Patententwurf in Bearbeitung beim Patentamt, amtliches Aktenzeichen 102015213376.1), 2014.
- [35] T. Werner and R. Fieß, "Projektionsvorrichtung für eine Bildgebereinheit eines Head-up-Displays, Bildgebereinheit, Verfahren zum Betreiben einer Projektionsvorrichtung und Verfahren zum Erzeugen eines Bildes in einem Head-up-Display," Erfindungsmeldung (Patententwurf in Bearbeitung beim Patentamt, amtliches Aktenzeichen 102015215097.6), 2014.
- [36] T. Werner, R. Fieß, and S. Mayer, "Holographisches Strahlformungselement für Laserprojektionssysteme," Erfindungsmeldung (Patententwurf in Bearbeitung beim Patentamt, amtliches Aktenzeichen 102016207236.6), 2015.
- [37] T. Werner and R. Fieß, "Hinterleuchtungsvorrichtung zum Hinterleuchten einer Anzeigeeinheit für ein Head-up-Display, Head-up-Display und Verfahren zum Hinterleuchten einer Anzeigeeinheit für ein Head-up-Display," Erfindungsmeldung (Patententwurf in Bearbeitung beim Patentamt, amtliches Aktenzeichen 102015226425.4), 2014.
- [38] T. Werner and R. Fieß, "Bildgebereinheit für ein Head-up-Display, Head-up-Display und Verfahren zum Erzeugen stereoskopischer Halbbilder mittels einer Bildgebereinheit," Erfindungsmeldung (Patententwurf in Bearbeitung beim Patentamt, amtliches Aktenzeichen 102015215106.9), 2014.
- [39] T. Werner and R. Fieß, "Abdeckelement zum Abdecken einer Projektionsöffnung eines Head-up-Displays, Head-up-Display und Verfahren zum Leiten von Licht durch ein Abdeckelement," Erfindungsmeldung (Patententwurf in Bearbeitung beim Patentamt, amtliches Aktenzeichen 102015222842.8), 2015.

- [40] T. Werner and R. Fieß, "Bilderzeugungsvorrichtung für ein Head-up-Display, Head-up-Display und Verfahren zum Erzeugen eines Bilds für ein Head-up-Display," Erfindungsmeldung (Patententwurf in Bearbeitung beim Patentamt, amtliches Aktenzeichen 102014217180.6), 2014.
- [41] T. Werner and R. Fieß, "Sichtfeldanzeigevorrichtung für ein Fahrzeug und Verfahren zum Darstellen eines Bildes in einem Sichtbereich einer Person," Erfindungsmeldung (Patententwurf in Bearbeitung beim Patentamt, amtliches Aktenzeichen 102015206796.3), 2014.
- [42] D. Schreuder, *Outdoor Lighting: Physics, Vision and Perception*. Springer Netherlands, 2008.
- [43] Robert Bosch GmbH. (2013) Projekt Autostereoskopisches Head-Up Display, Lastenheft. Zentralbereich Forschung und Vorentwicklung.
- [44] T. Järvenpää and M. Salmimaa, "Optical characterization of autostereoscopic 3-D displays," *Journal of the SID*, 2008.
- [45] A. Woods, "Understanding Crosstalk in Stereoscopic Displays," *3DSA (Three-Dimensional Systems and Applications) conference*, 2010.
- [46] A. Boev, R. Bregovic, and A. Gotchev, "Visual-quality evaluation methodology for multiview displays," *Displays*, vol. 33, pp. 103 – 112, 2012.
- [47] P. Seuntjens, L. Meesters, and W. IJsselsteijn, "Perceptual attributes of crosstalk in 3D images," *Displays*, vol. 26, pp. 177 – 183, 2005.
- [48] N. Henze, *Stochastik für Einsteiger*. Springer Spektrum, 2013.
- [49] L. Wang, T. Tschudi, T. Halldórsson, and P. R. Pétursson, "Speckle reduction in laser projection systems by diffractive optical elements," *Appl. Opt.*, vol. 37, pp. 1770–1775, 1998.

- [50] W. Plaß, D. Rathjen, and H. Burggraf, "Verfahren zur Specklereduktion," *Offenlegungsschrift*, DE10118662A1, November 2002.
- [51] J. I. Trisnadi, "Speckle contrast reduction in laser projection displays," *Proc. of SPIE*, vol. 4657, pp. 131–137, 2002.
- [52] A. Frederiksen, "Auslegung von miniaturisierten Flying-Spot-Laserprojektoren für eine optimale visuelle Wahrnehmung," Ph.D. dissertation, Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), 2012.
- [53] T. Werner, R. Fieß, and C. Neumann, "Optical design of a Flying Spot Projection based autostereoscopic Head-Up Display," in *The 5th Laser Display and Lighting Conference (LDC'16)*, Jena, Germany, Juli 2016.
- [54] C.-H. Tsai, P. L. nad Kuen Lee, and C. Lee, "Fabrication of a large F-number lenticular plate and its use as a smallangle flat-top diffuser in autostereoscopic display screens," *Proc. of SPIE*, vol. 3957, 2000.
- [55] C.-H. Lee, M.-C. Choub, and Y.-C. Chenb, "The design and fabrication of an optical diffuser for head-up displays," *Proc. of SPIE*, vol. 9302, 2015.
- [56] M. O. Freeman, "MEMS Scanned Laser Head-Up Display," *Proc. of SPIE*, vol. 7930, 2011.
- [57] M. K. Hedili, M. O. Freemanb, and H. Ureya, "Microstructured head-up display screen for automotive applications," *Proc. of SPIE*, vol. 8428, 2012.
- [58] O. S. Oh and Y. Kwak, "Investigation of the Helmholtz-Kohlrausch effect using wide-gamut display," *Proc. of SPIE*, vol. 9395, 2015.

- [59] Robert Bosch GmbH, Benno Rösener. (2015) Projekt Autostereoskopisches Head-Up Display. Zentralbereich Forschung und Vorausentwicklung.
- [60] H. Nishio and Y. Takaki, "Development of super multi-view head-up display and evaluation of motion parallax smoothness," *Proc. of SPIE-IS&T Electronic Imaging*, vol. Vol. 8648, 2013.
- [61] W. O. Davis, M. Beard, and R. Jackson, "Trajectory precision of micromachined scanning mirrors for laser beam scanning pico-projector displays," *Proc. of SPIE*, vol. 8252, pp. 825 203–825 203–11, 2012.
- [62] W. O. Davis, R. Sprague, and J. Miller, "MEMS-based pico projector display," in *Optical MEMs and Nanophotonics, 2008 IEEE/LEOS International Conference on*, Aug 2008, pp. 31–32.
- [63] J. Grahmann, M. Wildenhain, T. Grasshoff, C. Gerwig, H.-G. Dallmann, A. Wolter, and H. Schenk, "Laser Projector Solution Based On Two 1D Resonant Scanning Micro Mirrors Assembled in a Low Vertical Distortion Scan Head," *Proc. of SPIE*, vol. 8252, pp. 825 205–825 205–9, 2012.
- [64] Robert Bosch GmbH, Michael Gilowski. (2014) Projekt Autostereoskopisches Head-Up Display. Zentralbereich Forschung und Vorausentwicklung.
- [65] Robert Bosch GmbH, Simone Höckh. (2015) Projekt Autostereoskopisches Head-Up Display. Zentralbereich Forschung und Vorausentwicklung.
- [66] J. Khan, C. Can, A. Greenaway, and I. Underwood, "A real-space interactive holographic display based on a large-aperture HOE," *Proc. SPIE*, vol. 8644, pp. 86 440M–86 440M–8, 2013.
- [67] D. Voloschenko, Z. Li, and G. T. Valliath, "Head-up Display," United States Patent, US007031067B2, April 2006.

- [68] S. Mayer, "Holographie in der Displaytechnologie," Ph.D. dissertation, Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), 2015.
- [69] I. Wallhead and R. Ocana, "Optical design of a laser scanning picoprojector," *Proc. of SPIE*, vol. 8550, pp. 85 502L–85 502L–8, 2012.
- [70] Z. Tong, X. Chen, M. N. Akram, and A. Aksnes, "Compound Speckle Characterization Method and Reduction by Optical Design," *Journal of Display Technology*, 2012.
- [71] M. N. Akram, G. Ouyang, W. Gao, Z. Tong, and X. Y. Chen, "Speckle reduction in line-scan laser projectors using binary phase codes: theory and experiments," *Proc. SPIE*, vol. 7387, pp. 73 871P–73 871P–7, 2010.
- [72] V. Yurlov, A. Lapchuk, S. Yun, J. Song, I. Yeo, H. Yang, and S. An, "Speckle suppression in scanning laser displays: aberration and defocusing of the projection system," *Appl. Opt.*, vol. 48, no. 1, Jan 2009.
- [73] A. Furukawa, N. Ohse, Y. Sato, D. Imanishi, K. Wakabayashi, S. Ito, K. Tamamura, and S. Hirata, "Effective speckle reduction in laser projection displays," *Proc. SPIE*, vol. 6911, 2008.
- [74] Optotune AG, "Extended datasheet: LSR-OEM Series," Tech. Rep., 2013.
- [75] D. Stadler, M. Suter, and D. Niederer, "Speckle reduction with reluctance force-based oscillating diffusors," *The 4th Laser Display and Lighting Conference (LDC 15)*, 2015.
- [76] J. Giger, M. Blum, and M. Aschwanden, "Laser Speckle Reduction based on electroactive polymers," *The 1st Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS 12)*, 2012.
- [77] C. Graetzel, M. Sutura, and M. Aschwanden, "Reducing laser speckle with electroactive polymer actuators," *Proc. of SPIE*, vol. 9430, 943004, 2015.

- [78] H. A. Eberl, "Verwendung eines holographischen Bildschirms als Darstellungsfläche in einem Fahrzeug," Deutsches Patent, Juli 1997.
- [79] J. Weingarten and A. Frederiksen, "Bildanzeigeeinheit und Verfahren zum Betreiben einer Bildanzeigeeinheit," Deutsches Patent, DE102012222421A1, Dezember 2012.
- [80] S. C. Masin, V. Zudini, and M. Antonelli, "Early alternative derivations of fechner's law," *Journal of the History of the Behavioral Sciences*, vol. 45, no. 1, pp. 56–65, 2009.
- [81] G. M. J. Craggs, F. Riechert, Y. Meuret, H. Thienpont, J. Danckaert, and U. Lemmer, "Speckle characteristics of a laser projector using nonmodal laser emission of a semiconductor laser," *Proc. of SPIE*, vol. 7387, 2010.
- [82] Z. Liao, T. Xing, G. Cheng, and W. Lin, "Speckle reduction in laser projection display by modulating illumination light," *Proc. SPIE*, vol. 6622, pp. 662 229–662 229–9, 2007.
- [83] G. L. Vick, "Holographic Head-Up Display," United States Patent, US005198895A, März 1993.
- [84] T.-K.-T. Tran, S. Subramaniam, C.-P. Le, S. Kaur, S. Kalicinski, M. Ekwinska, E. Halvorsen, and M. N. Akram, "Design, Modeling, and Characterization of a Microelectromechanical Diffuser Device for Laser Speckle Reduction," *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2013.
- [85] G. Li, Y. Qiu, Y. Zheng, and H. Li, "The variation laws of mutual coherence function in laser projector with moving diffuser for speckle reduction," *Proc. of SPIE*, 2012.
- [86] S. C. Shin, S. S. Yoo, S. Y. Lee, C.-Y. Park, S.-Y. Park, J. W. Kwon, and S.-G. Lee, "Removal of hot spot speckle on laser projection screen using both the running screen and the rotating diffuser," *Displays*, vol. 27, pp. 91 – 96, 2006.

- [87] D. Kappel, R. E. Fischer, and B. Tadic-Galeb, "Illumination device and method for laser projector," United States Patent, US006870650B2, März 2005.
- [88] D. Rui, Z. Lin, K. Qi, and W. Chen, "Optical design in illumination system of digital light processing projector using laser and gradient-index lens," *Optical Engineering*, vol. 51, no. 1, pp. 013 004–1–013 004–7, 2012.
- [89] Robert Bosch GmbH, Dirk Schmidt. (2016) Projekt AR-HUD Technologien für minimalen Bauraum. Zentralbereich Forschung und Voraentwicklung.
- [90] U. A. R. T. Kamwa, "Simulation, setup and evaluation of a laser based projection unit for display systems," Master's thesis, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2016.
- [91] Robert Bosch GmbH, Ingo Ramsteiner. (2012) Berechnungstool optischer Eigenschaften von dünnen Schichten. Zentralbereich Forschung und Voraentwicklung.
- [92] P. Schreiber, S. Kudaev, P. Dannberg, and U. Zeitner, "Homogeneous LED-illumination using microlens arrays," *Proc. of SPIE*, 2005.
- [93] Robert Bosch GmbH, Dirk Schmidt. (2014) Projekt Autostereoskopisches Head-Up Display. Zentralbereich Forschung und Voraentwicklung.
- [94] S. Schmelzer, "Evaluation eines elektromechanischen Nachführungssystems für die Bildgebereinheit eines autostereoskopischen Head-Up Displays," Bachelor's Thesis, Hochschule Pforzheim, 2014.
- [95] Robert Bosch GmbH, Michael Gilowski, Annette Frederiksen. (2015) Projekt Autostereoskopisches Head-Up Display. Zentralbereich Forschung und Voraentwicklung.

- [96] S. Höckh, "Anforderungsanalyse und Konzeptevaluierung für ein autostereoskopisches Head-Up Display," Ph.D. dissertation, Technische Universität Berlin, 2016.
- [97] Robert Bosch GmbH, Felix Stöhrer . (2013) Projekt Autostereoskopisches Head-Up Display. Zentralbereich Forschung und Vorausentwicklung.
- [98] Robert Bosch GmbH, Julian Hauss. (2012) HUD Design Tool. Geschäftsbereich Car Multimedia.
- [99] Robert Bosch GmbH, Musterbau. (2015) Forschungsmusterbau Renningen. Zentralbereich Forschung und Vorausentwicklung.
- [100] OSRAM Opto Semiconductors GmbH. (2012) Datenblatt Golden DRAGON LW W5SM.
- [101] Luminus Devices, Inc., "SST-90 Product Datasheet," Datasheet, 2011.
- [102] BMW Group. (2013) Projekt ögP Picolo. BMW Forschung und Technik GmbH.
- [103] R. Börner, B. Duckstein, O. Machui, H. Röder, T. Sinnig, and T. Sikora, "A family of single-user autostereoscopic displays with head-tracking capabilities," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 10, pp. 234–243, 2000.
- [104] S. Ichinose, N. Tetsutani, and M. Ishibashi, "Technique of stereoscopic image display," European Patent, EP0354851, Aug 1989.
- [105] P. Allio, "Autostereoscopic video device and system," International Patent, WO9426072, May 1993.
- [106] S. Hentschke, "Position-adaptive autostereoscopic monitor (PAM)," United States Patent, US6307585, Oct 2001.
- [107] A. August, "Head-up-Display," German Patent, DE102009054232A1, Nov 2009.

- [108] C. Grossmann, "Calibration of an autostereoscopic display system," United States Patent, US009019354B2, April 2015.
- [109] S. Funck, "System zur Bestimmung der Lage eines Kamerasystems," Deutsches Patent, DE102007030378A1, Juni 2007.
- [110] C. van Berkel and J. A. Clarke, "Characterization and optimization of 3D-LCD module design," *Proc. SPIE*, vol. 3012, pp. 179–186, 1997.
- [111] E. Pasca and M. O. Freeman, "Avoiding interference artifacts in a Head-Up Display or a reflected see-through type display," United States Patent, US20090195875A1, August 2009.
- [112] T. Werner and R. Fieß, "Polarisationsdrehende Doppelbildreduzierte Frontscheibe," veröffentlichte Erfindungsmeldung, 2015.
- [113] Edmund Optics. (2015) Datenblatt Lamda/4 Retarder Film (Achromatic Waveplate).
- [114] OSRAM Opto Semiconductors GmbH, "OSLON MX LUW CN7N," Datasheet, 2013.
- [115] SeeFront GmbH, "SF3D-133CR," Datasheet, 2015.
- [116] Edmund Optics. (2015) Datenblatt Techspec High Contrast Plastic Linear Polarizer 0,75 mm.
- [117] E. Hering, R. Martin, and M. Stohrer, *Physik für Ingenieure*. Springer-Verlag, 2007.
- [118] S. Magarill, "LED Illuminator for a Microdisplay Projector," *Proc. of SPIE*, vol. 8487, pp. 848 707–848 707–9, 2012.
- [119] W. P. Bleha and L. A. Lei, "Advances in Liquid Crystal on Silicon (LCOS) Spatial Light Modulator Technology," *Proc. of SPIE*, vol. 8736, 2013.
- [120] T. Ewing, J. Buck, S. Serati, A. Linnenberger, H. Masterson, and J. Stockley, "Liquid Crystal on Silicon (LCOS) devices and their application to scene projection," *Proc. of SPIE*, vol. 8356, 2012.

- [121] A. Lizanaa, N. Martina, E. Fernandezb, A. Márquezb, I. Morenoc, C. Iemmid, J. Camposa, and M. J. Yzuela, "Influence of the incident angle in the performance of LCoS displays," *Proc. of SPIE*, vol. 6994, 2008.
- [122] J. Geng, "Volumetric 3D Display Using a DLP Projection Engine," *Proc. SPIE*, vol. 8254, pp. 82 540I–82 540I–10, 2012.
- [123] D. Bahr, K. Langhans, M. Gerken, C. Vogt, D. Bezecny, and D. Homann, "FELIX: a volumetric 3D laser display," *Proc. SPIE*, vol. 2650, pp. 265–273, 1996.
- [124] K. Bark, C. Tran, K. Fujimura, and V. Ng-Thow-Hing, "Personal Navi: Benefits of an Augmented Reality Navigational Aid Using a See-Thru 3D Volumetric HUD," *Association for Computing Machinery*, 2014.
- [125] I. N. Kompanets and S. A. Gonchukov, "Volumetric displays," *Proc. SPIE*, vol. 5821, pp. 125–136, 2005.
- [126] C. T. Grabowski and T. Zamojdo, "En route navigation display method and apparatus using head-up display," United States Patent, US008521411B2, August 2013.
- [127] M. C. Knauer, J. Kaminski, and G. Häusler, "Phase Measuring Deflectometry: a new approach to measure specular free-form surfaces," *Proc. of SPIE*, 2004.
- [128] Robert Bosch GmbH. (2014) Produktbereich Anzeigesysteme. Geschäftsbereich Car Multimedia.
- [129] S. J. Lee, M. J. Kim, K. H. Lee, and K. H. Park, "Review of Wire Grid Polarizer and Retarder for Stereoscopic Display," *Proc. of SPIE*, vol. 7237, pp. 72 370P–72 370P–10, 2009.

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich mich bei denen bedanken, die zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit beigetragen haben.

Dazu gilt mein besonderer Dank meinem Doktorvater Prof. Dr. Cornelius Neumann für die Aufnahme als Doktorand, für die konstruktiven Diskussionen, sowie für die hilfreichen Tipps auch über fachliche Dinge hinaus.

Prof. Dr. Wilhelm Stork möchte ich für die freundliche Übernahme des Korreferats danken.

Auch bei Herrn Dr. Reinhold Fieß möchte ich mich ganz besonders für die Betreuung der Arbeit seitens der Robert Bosch GmbH bedanken. Die vielen fachlichen Diskussionen haben sehr zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Danke für die Unterstützung und für das entgegengebrachte Vertrauen.

Insbesondere möchte ich mich bei Herrn Dr. Michael Gilowski für die Unterstützung seit dem ersten Tag bei Bosch bedanken. Vielen Dank für die Hilfsbereitschaft und besonders für das intensive Korrekturlesen dieser Arbeit.

Bei Herrn Hartmut Spannemann möchte ich mich für die Aufnahme in die Arbeitsgruppe, für das entgegengebrachte Vertrauen und die Freiheiten während der Promotion bedanken.

Des Weiteren möchte ich mich beim Projektteam des Bosch Forschungsprojekts „Autostereoskopisches HUD“ für die gute Zusammenarbeit, die fachlichen Diskussionen und die Unterstützung bei Problemstellungen bedanken. Dr. Michael Gilowski, Dr. Simone Höckh, Dr. Annette Frederiksen und Dr. Benno Rösener seien hier besonders genannt.

Bei Herrn Dirk Schmidt möchte ich für die gute Zusammenarbeit und die interessanten Diskussionen im Bereich der mechanischen Konstruktionen danken.

Bei Steven Schmelzer und Uriel Kamwa möchte ich mich für die gute Zusammenarbeit und die Unterstützung durch ihre studentischen Arbeiten bedanken.

Mein Dank gilt auch der Optik-Gruppe CR/ARE2 des Zentralbereichs für Forschung und Voraentwicklung der Robert-Bosch GmbH für das Ermöglichen dieser Arbeit und für die vielen Einblicke in die unterschiedlichen Themengebiete. Ich bedanke mich für viele interessante Diskussionen, für die Unterstützung bei fachlichen und organisatorischen Problemen und für die kollegiale Zusammenarbeit.

Zuletzt möchte ich mich auch bei meiner Familie, bei meiner Freundin und meinen Freunden für ihre Unterstützung und ihr Verständnis bedanken. Vielen Dank für den Rückhalt und das Motivieren vor allem in den stressigen Phasen der Promotion.

SPEKTRUM DER LICHTTECHNIK

Lichttechnisches Institut
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

ISSN 2195-1152

- Band 1 Christian Jebas
**Physiologische Bewertung aktiver und passiver
Lichtsysteme im Automobil.** 2012
ISBN 978-3-86644-937-4
- Band 2 Jan Bauer
**Effiziente und optimierte Darstellungen von
Informationen auf Grafikanzeigen im Fahrzeug.** 2013
ISBN 978-3-86644-961-9
- Band 3 Christoph Kaiser
**Mikrowellenangeregte quecksilberfreie
Hochdruckgasentladungslampen.** 2013
ISBN 978-3-7315-0039-1
- Band 4 Manfred Scholdt
**Temperaturbasierte Methoden zur Bestimmung der
Lebensdauer und Stabilisierung von LEDs im System.** 2013
ISBN 978-3-7315-0044-5
- Band 5 André Domhardt
**Analytisches Design von Freiformoptiken
für Punktlichtquellen.** 2013
ISBN 978-3-7315-0054-4
- Band 6 Franziska Herrmann
Farbmessung an LED-Systemen. 2014
ISBN 978-3-7315-0173-2
- Band 7 Simon Wendel
Freiform-Optiken im Nahfeld von LEDs. 2014
ISBN 978-3-7315-0251-7
- Band 8 Carmen Kettwich
**Ablenkung im Straßenverkehr und deren
Einfluss auf das Fahrverhalten.** 2014
ISBN 978-3-7315-0288-3

- Band 9 Steffen Michenfelder
**Konzeption, Realisierung und Verifikation eines automobilen
Forschungsscheinwerfers auf Basis von Digitalprojektoren.** 2015
ISBN 978-3-7315-0301-9
- Band 10 Celal Mohan Ögün
**Surface wave driven molecular low pressure plasmas
for general lighting.** 2016
ISBN 978-3-7315-0464-1
- Band 11 Theresa Bonenberger
LED Farbmischung mit chaotischen Lichtleitern. 2016
ISBN 978-3-7315-0480-1
- Band 12 Michael Schöne
**Diffraktive Optiken im Automobil:
Achromatisierung, Athermalisierung, Formung
von Scheinwerferlichtverteilungen.** 2017
ISBN 978-3-7315-0613-3
- Band 13 Tobias Werner
**Simulation, Aufbau und Charakterisierung
von autostereoskopischen Display-Systemen
im Fahrzeugbereich.** 2017
ISBN 978-3-7315-0617-1



Lichttechnisches Institut
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Als ein modernes Fahrerassistenzsystem werden Head-up Displays zur ergonomischen Überlagerung virtueller Bildinhalte mit der Fahrszene eingesetzt.

Diese Arbeit befasst sich mit der funktionalen Erweiterung dieser Systeme durch einen autostereoskopischen Ansatz, bei dem ein räumlicher Tiefeneindruck durch die Fusionierung zweier dargebotener Teilbilder entsteht. Speziell entwickelte Simulationstechnik dient dabei als Basis für die optische Auslegung. Es werden technologisch verschiedene Konzepte entwickelt, simulativ untersucht, sowie in prototypischen Aufbauten realisiert und charakterisiert.

ISSN 2195-1152
ISBN 978-3-7315-0617-1

